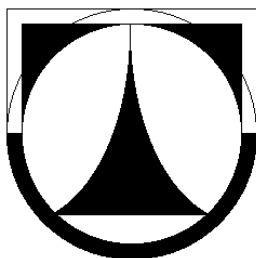


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ



Diplomová práce

STANOVENÍ REZONANCE NANOVLÁKENNÉ VRSTVY
V ZÁVISLOSTI NA JEJÍCH PARAMETRECH

DESIGNATION OF RESONANCE OF NANOFIBRES LAYER
IN DEPENDENCE ON ITS CHARACTERISTICS

2007

HEJGRLÍKOVÁ ZUZANA

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ

**STANOVENÍ REZONANCE NANOVLÁKENNÉ VRSTVY
V ZÁVISLOSTI NA JEJÍCH PARAMETRECH**

**DESIGNATION OF RESONANCE OF NANOFIBRES LAYER
IN DEPENDENCE ON ITS CHARACTERISTICS**

Autor diplomové práce: Zuzana Hejgrlíková

Vedoucí diplomové práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Rozsah práce:

stran	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
70	49	16	41	6

V Liberci dne 11. května 2007

Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Katedra netkaných textilií

Školní rok 2006 - 2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro: **Zuzanu Hejgrlíkovou**
obor: 3106-T004 Netkané textilie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Stanovení rezonance nanovlákněné vrstvy v závislosti na jejích parametrech**

Zásady pro vypracování :

- 1) prostudujte teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování rezonančních membrán, fólií a vlákněných materiálů
- 2) připravte sérii vzorků: nanovlákněné vrstvy různých plošných hmotností
- 3)
 - a) proměřte frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na plošné hmotnosti nanovrstvy, vzdálenosti nanovrstvy od odrazivé stěny a počtu nanovrstev
 - b) stanovte rezonanční frekvenci vzorků v závislosti na plošné hmotnosti nanovrstvy, vzdálenosti nanovrstvy od odrazivé stěny a počtu nanovrstev
- 4) diskutujte závěry
 - a) vliv parametrů vzorků na průběh frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti
 - b) vliv parametrů vzorků na jejich rezonanční frekvenci

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 11. května 2007

.....

Podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Kláře Kalinové, Ph.D., za její zájem, rady, připomínky a trpělivost při vzniku této práce. Děkuji také své rodině za veškerou podporu během celého studia.

Stanovení rezonance nanovláknenné vrstvy v závislosti na jejích parametrech

Anotace

Tato diplomová práce studuje zvukově pohltivé vlastnosti nanovláknenné vrstvy. První část obsahuje souhrn teoretických poznatků o principech zvukového pohlcování různými materiály v souvislosti s jejich strukturou. Další část práce se věnuje určení činitele zvukové pohltivosti v závislosti na měnící se frekvenci pro různé absorpční soustavy obsahující nanovláknennou vrstvu, jejíž pohlcující účinek je podpořen vzduchovým prostorem mezi nanovrstvou a odrazivou stěnou. Na základě těchto měření je vyhodnocen vliv různých parametrů na zjišťovanou veličinu.

Klíčová slova: nanovláknenná membrána, činitel zvukové pohltivosti, rezonanční systém

Designation of resonance of nanofibres layer in dependence on its characteristics

Annotation

This diploma thesis deals with the sound absorption characteristics of nanofibres layer. The first part of this paper contains summary of theoretical knowledges of the principles of sound absorption by different materials in connection with their structure. The second part is devoted to the measurement of sound absorption coefficient in dependence on changing frequency for different sound absorption system containing nanofibres layer with an air-back cavity. On the basis of these measurements, influence of different parameters on measured quantity is evaluated.

Key words: nanofibres membrane, sound absorption coefficient, resonance system

Obsah

1 ÚVOD	11
2 TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 TEORIE ZVUKU.....	13
2.1.1 Zvuk jako mechanické vlnění.....	13
2.1.2 Základní pojmy akustiky	15
2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti.....	16
2.2 MECHANIKA POHLCOVÁNÍ.....	18
2.2.1 Porézní materiály	19
2.2.2 Obklady založené na rezonančním principu.....	19
2.2.2.1 Kmitající membrány	20
2.2.2.2 Kmitající desky.....	22
2.2.2.3 Helmholtzovy rezonátory a děrované desky.....	23
2.3 METODY MĚŘENÍ Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	24
2.3.1 Dvoustupňová impedanční trubice	24
2.4 TEORIE VÝROBY NETKANÝCH TEXTILÍ.....	26
2.4.1 Technologie výroby netkaných textilií.....	26
2.4.2 Elektrostatické zvlákňování	26
2.4.2.1 Princip elektrostatického zvlákňování	26
2.4.2.2 Metoda „Nanospider“	28
2.4.3 Polyvinylalkohol	28
2.5 TEORETICKÉ POZNATKY O POHLCOVÁNÍ ZVUKU	29
2.5.1 Využití porézních a vláknitých materiálů v oblasti zvukové pohltivosti.....	29
2.5.2 Využití obkladů založených na rezonančním principu	31
2.5.2.1 Metoda návrhu membránového typu absorbéru	31
2.5.2.2 Další studie absorbérů rezonančního typu.....	34
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
3.1 CÍL.....	37
3.2 ÚKOLY	37
3.3 VÝROBA MEMBRÁNY	37
3.4 VÝROBA VZORKU	38
3.5 POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	39
3.6 POSTUP MĚŘENÍ	40
3.6.1 Proměňování absorpčního vzorku v různé vzdálenosti od odrazivé stěny.....	40
3.6.2 Vrstvení absorpčních vzorků směrem od odrazivé stěny	41
3.6.3 Vrstvení absorpčních vzorků směrem k odrazivé stěně	41
3.6.4 Měření samotné nanovláknité vrstvy.....	42
3.6.5 Měření samostatného papírového kroužku.....	43
3.7 OZNAČOVÁNÍ VZORKŮ	43
3.8 VYHODNOCOVÁNÍ GRAFŮ	44
3.9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	49
4 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ	51
4.1 VLIV VELIKOSTI VZDUCHOVÉHO POLŠTÁŘE NA REZONANČNÍ VLASTNOSTI ABSORPČNÍHO ČLENU	51

4.2 Vliv velikosti vzduchového polštáře na rezonanční vlastnosti nanovlákené vrstvy	54
4.3 Vliv vrstvení absorpčních členů na zvukově pohltivé vlastnosti celkové soustavy	59
5 ZÁVĚR	64
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
7 SEZNAM PŘÍLOH	70

Seznam symbolů

a	[m]	délka desky
a_i	[-]	koeficient pro výpočet rezonančních frekvencí
A₁	[-]	specifická akustická admitance vstupní strany membrány
A₂	[-]	specifická akustická admitance výstupní strany membrány
A_b	[-]	specifická akustická admitance povrchu pevné stěny
b	[m]	šířka desky
c	[m.s ⁻¹]	rychlost šíření zvuku prostředím
c_a	[m.N ⁻¹]	akustická poddajnost
c_M	[m.s ⁻¹]	rychlost příčné vlny šířící se na membráně
d	[m]	tloušťka vzduchové vrstvy
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
E_{pohlčená}	[J]	energie pohlčená
E_{dopadající}	[J]	energie dopadající
E_{odražená}	[J]	energie odražená
E_{prošlá}	[J]	energie prošlá
f	[Hz]	frekvence zvuku
f_r	[Hz]	rezonanční (vlastní) frekvence
F_r	[N]	celková napínací síla
h	[m]	tloušťka desky
I	[W.m ⁻²]	intenzita zvuku
I_o	[W.m ⁻²]	prahová hodnota intenzity zvuku
I_{pohl}	[W.m ⁻²]	intenzita pohlčeného zvuku
I_{dop}	[W.m ⁻²]	intenzita dopadajícího zvuku
k	[m ⁻¹]	vlnové číslo
L	[dB]	hladina intenzity zvuku
m	[kg]	hmotnost
m_p	[kg.m ⁻²]	plošná hmotnost
m_a	[kg]	akustická hmotnost
m₁	[kg.m ⁻²]	plošná hmotnost homogenní elastické membrány
p_a	[Pa]	akustický tlak
p_i	[Pa]	dopadající složka akustického tlaku

p_r	[Pa]	odražená složka akustického tlaku
r	[m]	poloměr membrány
R	[-]	činitel zvukové odrazivosti
R_a	[Pa.s.m ⁻³]	akustický odpor
S	[m ²]	plocha
S_1	[m ²]	plocha průřezu dutiny
S_2	[m ²]	plocha rezonátoru
T	[s ⁻¹]	perioda
u	[m.s ⁻¹]	akustická rychlost
v	[N.m ⁻¹]	radiální napínací síla
V	[m ³]	objem dutiny
V	[m ³ .s ⁻¹]	objemová rychlost
W	[W]	akustický výkon
z	[Pa.s.m ⁻¹]	akustický vlnový odpor (impedance)
z_1	[m]	hloubka vzduchové mezery
Z	[Pa.s.m ⁻³]	akustická impedance (odpor)
α	[-]	činitel zvukové pohltivosti
β	[-]	činitel zvukové odrazivosti
θ	[°]	úhel dopadu rovinné vlny
λ	[m]	vlnová délka
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota vzduchu
σ	[-]	Poissonova elastická konstanta
σ_t	[N.m ⁻¹]	tahové napětí
τ	[-]	součinitel pruživosti
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost kmitů

1 Úvod

Veškerý nežádoucí zvuk je nazýván rušivým hlukem a je zahrnován mezi faktory znečišťující životní prostředí. Akusticky vyvážené prostředí často hraje důležitou roli při ovlivňování lidského nervového systému. Odpovídajícím výběrem a umístěním akustických systémů je možno zlepšit srozumitelnost projevu, omezit nežádoucí zvuky nebo zvýšit míru soukromí v rámci daného prostoru nebo mezi přilehlými místnostmi a zlepšit pocit pohody u lidí. Proto je důležité se zabývat otázkou pohlcování zvuku.

Zvukově pohltivé materiály jsou známy a hojně využívány řadu let. Mnoho odborníků se zabývalo studováním principů pohlcování a vyvíjením predikčních modelů a rovnic. Existuje již mnoho materiálů a výrobků, které byly navrženy pro účely pohlcování zvuku. Stále se však projevuje snaha vyvíjet nové materiály s dokonalejšími vlastnostmi, pro širší okruh použití, vznikající ekonomičtější technologií výroby. Výrobky s tímto efektem jsou aplikovány v oblastech automobilového, leteckého průmyslu, stavebnictví a strojínského průmyslu. Zvukové absorbéry přináší akustické a protihlukové řešení do zvukových studií, koncertních sálů, přednáškových sálů, divadel, kin, učeben, stadionů, průmyslových hal atd.

Jako absorpční prvky se využívají různé materiály, textilní či netextilní. Určité pohltivé vlastnosti mají i látky, které se pro tento konkrétní účel nepoužívají a jejich zvuková pohltivost je druhotným efektem [2]. Jedná se např. o tapety, závěsy, dřevo, beton, atd., které plní funkci např. zastiňování, stavební, dekorativní, tepelně izolační.

Poté co byl zrealizován průmyslový způsob výroby nanovláknenných vrstev, hledaly se pro ně různá využití. Experimentálně bylo zjištěno, že nanovrstvu lze úspěšně použít jako součást zvukového absorberu, který je tvořen nanovrstvou nanesenou na porézní vláknenný materiál. Nanovláknenná vrstva plní funkci membrány. Rouno zajišťuje dostatečný útlum rezonující nanovrstvy. Jednotlivé rezonanční prvky jsou sdruženy do jednoho rezonančního systému položením těchto prvků na sebe [1].

Tato práce navazuje na myšlenku použít nanovrstvu pro aplikaci ve zvukové pohltivosti a pojednává o studii rezonančních charakteristik nanovláknenného materiálu.

Teoretická část se zabývá základními otázkami týkajícími se zvuku jako fyzikálního jevu. Dále zachycuje problém zvukové pohltivosti a zaměřuje se na principy pohlcování zvuku různými materiály. Část textu se věnuje parametru činitele zvukové pohltivosti a metodami, kterou lze měřit. Jsou zde také zmíněny některé predikční modely a rovnice související se studovanou problematikou.

Experimentální část zkoumá zvukově pohltivé vlastnosti nanovlákněných vrstev vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu o různých plošných hmotnostech (12,6; 5,8; 3,1 a 1,4 g.m⁻²). Nanovrstvy jsou uchyceny v nosné papírové konstrukci a nebo mezi díly měřicí trubice. Studovaná vrstva je umístována v různé vzdálenosti od odrazivé stěny (5; 10; 15; ...; 35 mm), tím se mění velikost vzduchové mezery a tedy významný účinek zvukové pohltivosti vzduchem. Vzorky nanovlákněných vrstev uchycené v nosné papírové konstrukci jsou kladeny do měřicí trubice za sebou v různém počtu (1-7 vzorků) v určité vzdálenosti od odrazivé stěny. V absorpčních soustavách je proměřován činitel zvukové pohltivosti pomocí impedanční trubice.

Zjištěné údaje jsou vyhodnoceny a je posuzováno jak ovlivňuje plošná hmotnost nanovrstvy, velikost vzduchového polštáře, počet a pořadí vrstev a odlišný způsob uchycení nanovrstvy činitele zvukové pohltivosti.

2 Teoretická část

2.1 Teorie zvuku

Zvuk je definován jako podélné mechanické kmitání molekul. Akustické kmitání pružného prostředí v rozsahu frekvencí zhruba od 16 Hz do 20 kHz je schopné vyvolat v lidském uchu zvukový vjem. Zvuky pod slyšitelnou hranicí (frekvence < 20 Hz) jsou označovány jako *infrazvuk*, zvuky nad slyšitelnou hranicí (frekvence > 20 kHz) jako *ultrazvuk*. Zvuk se může šířit jen v hmotném prostředí, nikoli ve vakuu [4].

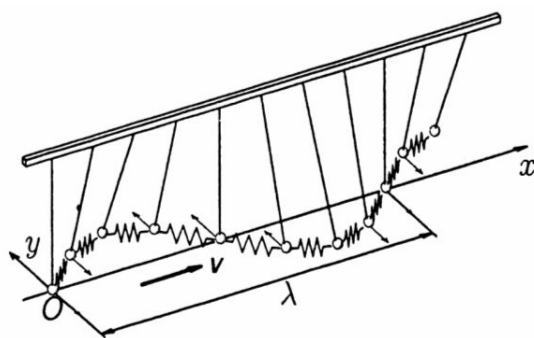
Akustika je rozsáhlý vědní obor, zabývající se komplexně zvukem od jeho vzniku, přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly. Má celou řadu poddisciplín. Např. *hudební akustika* zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a prostorů, *stavební akustika* zvukové jevy a souvislosti v uzavřeném prostoru, budovách a stavebách, *fyzilogická akustika* vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímání v uchu, *psychoakustika* vnímání zvuku v mozku, *elektroakustika* záznam, reprodukci a šíření zvuku s využitím elektrického proudu, *fyzikální akustika* způsob vzniku a šíření zvuku, jeho odraz a pohlcování v různých materiálech [3].

2.1.1 Zvuk jako mechanické vlnění

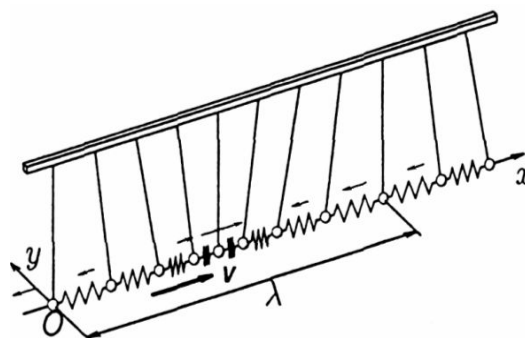
Podstatou mechanického vlnění je přenos kmitání látkovým prostředím. Šíření vln je spojeno s přenosem energie. Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství a jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi prostředí, ve kterém se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částici. Současně se tak na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako pružné prostředí. V pružném prostředí vzniká postupné vlnění [5].

Existují dva typy postupného mechanického vlnění:

- *Postupné vlnění příčné*: částice kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje (obr.1).
- *Postupné vlnění podélné*: částice kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje. Postupným vlněním podélným se v pružných látkách šíří např. *zvuk*. (obr.2). Toto vlnění charakterizuje zhušťování a zředňování kmitajících bodů okolo míst, v nichž jsou okamžité výchylky kmitajících bodů nulové. Zhuštění, popř. zředění postupuje rychlostí v ve směru osy x . Jednotlivá zhuštění nebo zředění jsou navzájem vzdálená o vlnovou délku λ .



Obr.1: Postupné vlnění příčné.
Čerpáno z [5].



Obr.2: Postupné vlnění podélné.
Čerpáno z [5].

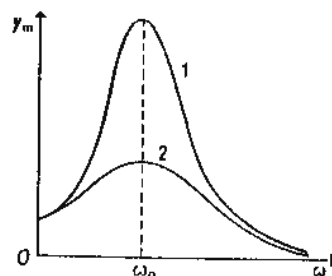
Jestliže vlnění dospěje k rozměrné překážce, popř. na rozhraní mezi dvěma prostředími, v nichž se vlnění šíří různou rychlostí, pak se od překážky vlnění odráží nebo rozhraním dvou prostředí prochází. Na překážce nastává odraz a lom vlnění.

Dorazí-li do jednoho místa dvě nebo více vlnění, dochází ke skládání neboli interferenci vlnění. Projevuje se tak, že výsledný kmitavý pohyb hmotných bodů prostředí je určen superpozicí kmitání vyvolaných vlněním (tj. algebraickým součtem výchylek jednotlivých vln) [5].

Rezonance mechanického oscilátoru

Když se frekvence nutící síly přiblíží vlastní frekvenci oscilátoru, velmi se zvětší amplituda kmitů. Dojde k rezonanci. Graf závislosti amplitudy nucených kmitů na frekvenci nutících kmitů je rezonanční křivka (obr.3). Poloha maxima křivky určuje rezonanční frekvenci oscilátoru a tvar křivky je značně ovlivněn tlumením. Ostré maximum charakterizuje oscilátor s malým tlumením, zatímco oscilátor s velkým tlumením má rezonanční křivku s méně výrazným maximem.

Význam rezonance spočívá v tom, že umožňuje rezonanční zesílení kmitů. Malou, periodicky působící silou lze v oscilátoru vzbudit kmitání o značné amplitudě výchylky, pokud je perioda vnějšího působení shodná s periodou vlastního kmitání oscilátoru.



Obr.3: Rezananční křivka. Čerpáno z [4].

Rezonanci můžeme považovat za vzájemné působení dvou oscilátorů. Jeden je zdrojem nuceného kmitání (*oscilátor*) a druhý se působením zdroje nuceně rozkmitá (*rezonátor*) [4].

2.1.2 Základní pojmy akustiky

Rychlost zvuku c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost, kterou se šíří zvuk prostředím. Vyjadřuje za jak dlouho překoná zvuková vlna v daném materiálu vzdálenost 1m ve směru šíření. Rychlost zvuku ve vzduchu je stejná pro všechny frekvence zvukového vlnění. V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu (popř. jiných plynech). Při teplotě vzduchu 20°C je rychlost šíření zvuku $c = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Akustický tlak p_a [Pa] je projev akustické energie v místě působení, tzn. tam, kde je akustický tlak odlišný od tlaku barometrického. Barometrický tlak nabývá hodnot kolem 10^5 Pa , akustický tlak se pohybuje v rozmezí $2\cdot 10^{-5} - 2\cdot 10^2 \text{ Pa}$ (pro frekvenci 1 kHz).

Akustická rychlost u [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost, kterou uspořádaně kmitají částice prostředí, kterým se zvuková vlna šíří.

Akustický výkon W [W] je výkon, který vyzařuje zdroj zvuku. Závisí na velikosti plochy a intenzitě zdroje zvuku. Je měřítkem celkové zvukové energie procházející plochou. Je dán integrálem skalárního součinu

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{dS}, \quad (1)$$

kde dS je vektor o velikosti dS ležící ve směru normály na plochu, $S [\text{m}^2]$ je plocha, na které je stanoven akustický výkon [4].

Intenzita zvuku I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] vyjadřuje akustický výkon W , který projde jednotkou plochy S kolmou na směr šíření zvukových vln

$$I = \frac{W}{S}. \quad (2)$$

Hladina intenzity zvuku L [dB] je definována vztahem

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (3)$$

kde I_0 je prahová hodnota intenzity zvuku ($I_0 = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ při frekvenci 1 kHz) [5].

Akustický vlnový odpor (impedance) z [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] je definován jako

$$z = \frac{p_a}{u}, \quad (4)$$

kde p_a [Pa] je akustický tlak a u [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je akustická rychlost. **Akustická impedance (odpor) Z** [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$] je určena podílem akustického tlaku p_a [Pa] a objemové rychlosti V [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$].

$$Z = \frac{p_a}{V} = \frac{p_a}{uS} = \frac{z}{S}. \quad (5)$$

Objemovou rychlostí je nazýván součin akustické rychlosti u [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a průřezu S [m^2], jímž se zvuk šíří [4]. **Akustická admittance** je převrácená hodnota akustické impedance a vyjadřuje snadnost, se kterou zvukové vlny pronikají prostředím.

Vlnová délka λ [m] je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází; nebo vzdálenost, kterou vlnění urazí za jednu periodu. Je dána vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad (6)$$

kde c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost šíření zvuku a f [Hz] je frekvence.

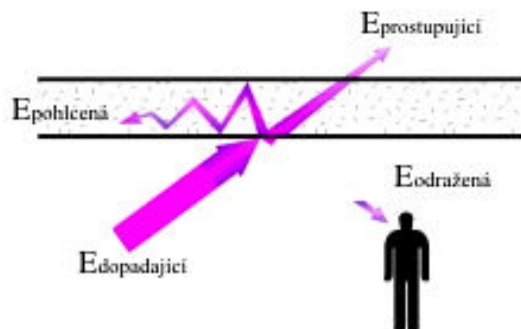
Perioda T [s] je nejkratší doba, za kterou se děj opakuje. **Kmitočet (frekvence) zvuku f** [Hz] vyjadřuje počet změn za jednotku času

$$f = \frac{1}{T}. \quad (7)$$

Zvuk je charakterizován výškou, barvou a hlasitostí. **Výška zvuku** je určena frekvencí kmitání zdroje zvuku. Čím větší je frekvence f tím větší je tón. **Barva zvuku** charakterizuje zdroj zvuku. Umožňuje sluchem rozeznat různé hudební nástroje, které vydávají tóny o stejné výšce. **Hlasitost zvuku** vyjadřuje, jak silně působí zvuk na normální sluch. Závisí na intenzitě zvuku a na citlivosti sluchu na zvuky různé frekvence [5].

2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti

Hodnota činitele zvukové pohltivosti α popisuje schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk. Činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. U stěny zcela pohlcující zvuk se činitel zvukové pohltivosti rovná 1, zatímco u stěny dokonale zvuk odrážející se tento činitel rovná 0.



Obr.4: Energie dopadající na materiál je částečně odražena, částečně absorbována a zčásti projde. Čerpáno z [6].

Pokud dopadá na povrch stěny, anebo jiné překážky zvuková vlna, potom se část zvukové energie odrazí zpět, část pohltí stěna a část projde do prostoru za stěnou. Součinitel pohltivosti α [-] je definován poměrem pohlcené akustické energie k celkové dopadající energii

$$\alpha = \frac{E_{\text{pohlcená}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (8)$$

Činitel zvukové odrazivosti β [-] je určen poměrem odražené akustické energie k celkové dopadající energii

$$\beta = \frac{E_{\text{odražená}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (9)$$

Poměr akustické energie, která prošla konstrukcí k celkové dopadající energii, definuje součinitel průzvučnosti τ [-]

$$\tau = \frac{E_{\text{prostupující}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (10)$$

Vzhledem k zákonu zachování energie musí platit: $\alpha + \beta + \tau = 1$ [2].

Množství energie, které je přenášeno postupnou vlnou, je charakterizováno intenzitou zvuku. Činitele lze tudíž vyjádřit také pomocí poměru intenzit pohlceného I_{pohl} a dopadajícího I_{dop} zvuku [4]

$$\alpha = \frac{I_{\text{poh}}}{I_{\text{dop}}} . \quad (11)$$

Větší pohltivost mají látky měkké a pórovité, např. plst', koberce, záclony, a z nich mají ještě větší pohltivost tkaniny, které nepřiléhají ke stěně. Velmi malý činitel pohltivosti

mají materiály kompaktní a hladké (kov, dlaždice, sklo atd.). Pohltivost látek závisí na frekvenci tónu užitého k jejímu určení. Všeobecně je pohltivost pro nižší tóny menší a pro vyšší tóny větší. Dále závisí pohltivost na úhlu dopadu zvukových vln [2].

2.2 Mechanika pohlcování

Pohlcování zvuku udává úroveň omezování hluku uvnitř místnosti. Akustické systémy absorbují zvukovou energii a slouží k řízení doby dozvuku. Vzduchová neprůzvučnost se vztahuje ke schopnosti tlumení hluku pronikajícího do místnosti zvenčí, například hluk z okolních místností, anebo z provozů umístěných nad místností [7]. Akustické obklady pro pohlcování zvuku mají nízký stupeň vzduchové neprůzvučnosti. Různá struktura akustických systémů poskytuje různé úrovně pohlcování zvuku.

Z hlediska pohlcování zvuku je možno obklady rozdělit do tří skupin

- ✓ obklady tvořené porézními materiály,
- ✓ obklady založené na principu rezonance,
- ✓ obklady složené pohltivé konstrukce.

Při pohlcování zvuku dochází k nevratné přeměně zvukové energie v energii jinou. Při šíření zvuku v pevných látkách je možné rozlišovat tři různé principy přeměny zvukové energie. Jedná se o

- ✓ přeměny vznikající třením,
- ✓ přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, tj. změnami relaxačními,
- ✓ přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

Přeměna zvukové energie v tepelnou třením je dosahována pohybují-li se vzduchové částice podél určité plochy. K pohlcování zvuku tímto způsobem se využívají látky porézní, ve kterých se zvuk šíří jemnými póry. K viskózním ztrátám zvukové energie dochází na stěnách otvorů, pórů, na povrchu kanálků nebo vláken.

Přeměna zvukové energie, označené jako relaxační, vzniká následkem akustického tlaku. Zvukové vlnění se šíří látkou v místech, ve kterých nastává zhuštění částic. Současně stoupá celkový tlak. To znamená, že akustický tlak nabývá kladných hodnot. Jestliže dojde ke zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se nashromážděná potenciální energie a tím se zmenší i energie zvukové vlny.

K přeměnám zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Po stlačení takové látky určitou silou se nevrátí tato

látky do původního stavu ani když síla přestane působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti [2].

2.2.1 Porézní materiály

Porézní materiál využívaný v akustice je pevná látka, v jejímž objemu jsou malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky bývá asi 80 až 99 % celkového objemu. Aby se zvuk mohl šířit materiálem, musí být jeho póry navzájem propojeny. Póry nemusí být propojeny u materiálů, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní z pórů snadno přechází. Vlastní pohlcování zvuku, tedy přeměna akustické energie v energii tepelnou, se děje v mezní vzduchové vrstvě u povrchu vláken nebo kostry vlivem viskózních sil.

Porézní materiály jsou děleny podle struktury na vláknité, kanálkovité a pěněné a podle materiálu na organické, minerální, skleněné a z plastických hmot.

Čím je porézní materiál tlustší, tím je činitel zvukové pohltivosti vyšší v oblasti nízkých kmitočtů, zároveň se zvýší i akustická poddajnost obkladu. Podobného účinku je dosaženo vytvořením uzavřeného vzduchového polštáře za porézní vrstvou. Porézní materiály se jen zřídka používají samotné pro jejich nevýhodný povrch. Jsou však nedílnou součástí většiny akustických obkladů [2].

2.2.2 Obklady založené na rezonančním principu

Tyto obklady můžou být roztrženy podle konstrukce do tří skupin

- ✓ kmitající membrány
- ✓ kmitající desky
- ✓ Helmholtzovy rezonátory.

Ve všech případech je možné najít náhradní zjednodušený mechanický model (obr.5).



Obr.5: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy o akustické hmotnosti m_a , akustické poddajnosti c_a a akustickém odporu R_a . Čerpáno z [2].

Rezonanční soustava je tvořena akustickou hmotností m_a , připojenou na akustickou poddajnost c_a , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem R_a . Dopadne-li na rezonanční soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude ještě po jistou dobu dokmitávat vlastním, rezonančním kmitočtem. Tento jev se nazývá dozívání. Doba dozvuku, po kterou takový rezonátor dozívá, je závislá na tlumení rezonátoru. Rezonanční soustava musí být dostatečně tlumena proto, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo [2].

2.2.2.1 Kmitající membrány

Kmitající membrána je tenká deska nebo fólie, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná a která je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny. Podle této úvahy představuje membrána těleso o hmotnosti m , které je umístěno na pružině reprezentované vzduchovým polštářem.

Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn porézním materiálem, který tlumí kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celou soustavu. Taková zvukově pohltivá soustava dosahuje zvýšení činitele pohltivosti a rozšíření pásma tlumených frekvencí.

Rezonanční frekvence f_r [Hz] netlumené membrány za předpokladu malé výchylky je dána vztahem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}}, \quad (12)$$

kde m [kg] je hmotnost membrány, S [m²] její plocha, d [m] je tloušťka vzduchové vrstvy a ρ [kg.m⁻³] je hustota vzduchu [2].

V práci [40] je popisována tenká homogenní elastická fólie s konstantní plošnou hmotností, která je napnuta na tuhý kruhový rám. Tímto napnutím vyvolaným radiálně působící silou membrána získává svoji tuhost. Radiálně působící napínací síla vztažená na jednotku délky obvodu rámu v [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je ve všech směrech konstantní a je rovna vztahu

$$v = \frac{F_r}{2\pi \cdot r}, \quad (13)$$

kde F_r [N] je celková napínací síla a r [m] udává poloměr membrány (neboli poloměr tuhé kruhové podpory, přes níž je membrána napjata).

Rychlost příčné vlny šířící se na membráně c_M [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je dána vztahem

$$c_M = \sqrt{\frac{v}{m_l}}, \quad (14)$$

kde v [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] je radiální napínací síla, m_l [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$] označuje plošnou hmotnost homogenní elastické membrány.

Pro vlnové číslo k [m^{-1}] platí

$$k_M = \frac{\omega}{c_M}, \quad (15)$$

kde ω [s^{-1}] je úhlová rychlost kmitů a c_M [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] představuje rychlost příčné vlny šířící se na membráně.

Pokud je splněn předpoklad osově symetrických kmitů, pak platí následující vztah, ze kterého lze pomocí koeficientů a_i z tab.1 stanovit vlastní frekvence membrány.

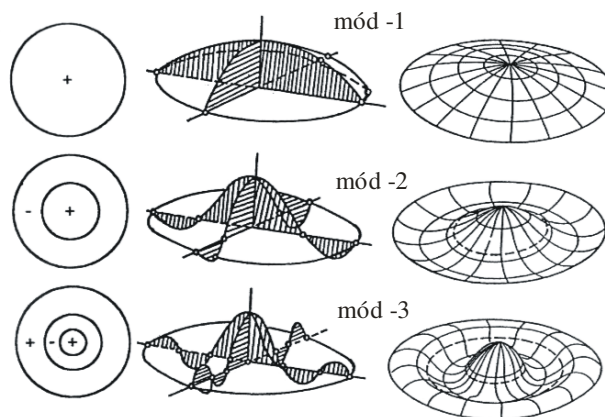
$$\omega_i = \frac{a_i c_M}{r}, \quad (16)$$

kde c_M [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost příčné vlny šířící se na membráně, r [m] udává poloměr membrány, ω_i [s^{-1}] je úhlová rychlost kmitů.

Tab.1: Hodnoty a_i symetrických volných kmitů tenké kruhové membrány. Čerpáno z [40].

i	1	2	3	4
a_i	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915

Na obr.6 je znázorněno rozložení výchylek prvních tří symetrických módů kmitání kruhové membrány. Jsou zde v řezech naznačeny průhybové čáry při jednotlivých módech, nakresleny uzlové čáry, označeny polarity výchylek a znázorněny tvary ploch.



Obr.6: Výchylky prvních tří symetrických módů kruhové membrány. Čerpáno z [40].

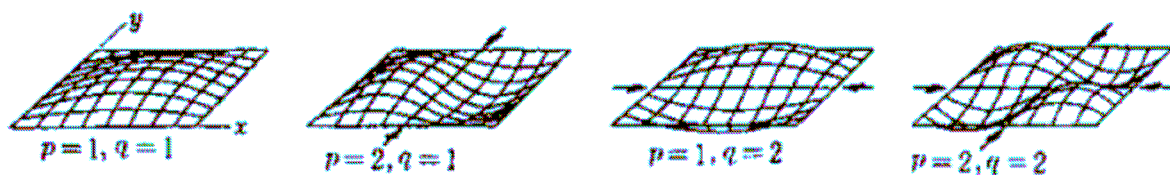
2.2.2.2 Kmitající desky

Kmitající deska je tvořena tuhou deskou, která je velmi měkce na okraji upevněna, takže kmitá jako píšť. Tuhost desky značně převyšuje tuhost vzduchového polštáře. Vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodným porézním materiálem se dosáhne potřebného tlumení kmitajících desek.

Vlastní frekvence f_r [Hz] homogenní obdélníkové desky o rozměrech a [m] \times b [m] a tloušťce h [m] upevněné na krajích jsou dány vztahem

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2 S}{md} + \frac{4\pi^2 S}{m} \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right]^2 \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}}, \quad (17)$$

kde S [m²] je plocha desky, m [kg] je hmotnost desky, E [Pa] je modul pružnosti desky, σ [-] je Poissonova elastická konstanta, d [m] je vzdálenost desky od stěny a p, q jsou celá čísla, která udávají mód kmitů (obr.7) [2].

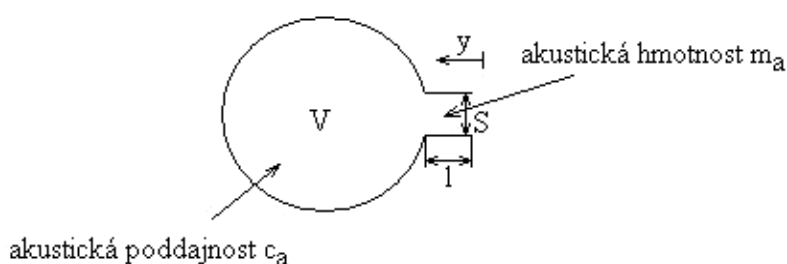


Obr.7: Některé módy vibrace v tuhé desce. Čerpáno z [8].

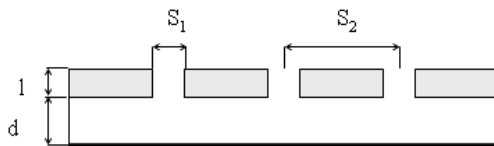
2.2.2.3 Helmholtzovy rezonátory a děrované desky

Rezonátory Helmholtzova typu jsou uspořádané buď jednotlivě nebo sdruženě do tzv. děrovaných desek. Děrované panely jsou tvořeny tuhou deskou, která je opatřena kruhovými nebo obdélníkovými otvory. Deska je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny, takže ke každému otvoru přísluší určitá dutina.

Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o objemu V , opatřenou hrdlem, v níž je určitá hmotnost, kterou si je možné představit jako píst. Vlastností objemu je poddajnost c_a , píst představuje akustickou hmotnost m_a . Pohybu pístu je kladen určitý odpor o velikosti R_a .



Obr.8: Schematické znázornění Helmholtzova rezonátoru. Čerpáno z [2].



Obr.9: Řez děrovaným panelem, který je sestaven z Helmholtzových rezonátorů. Čerpáno z [2].

Rezonanční frekvence f_r [Hz] pro uspořádání odpovídající sérii rezonátorů je dána vztahem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l d}}, \quad (18)$$

kde h [m] je tloušťka desky, umístěná ve vzdálenosti d [m] od pevné stěny, opatřena otvory o ploše S_1 [m²]. Každému otvoru připadá odpovídající stěna S_2 [m²] [2].

2.3 Metody měření činitele zvukové pohltivosti

Pro stanovení činitele zvukové pohltivosti existuje několik metod, např. metoda měření v dozvukové místnosti, metoda odražené vlny nebo metoda měření v impedanční trubici.

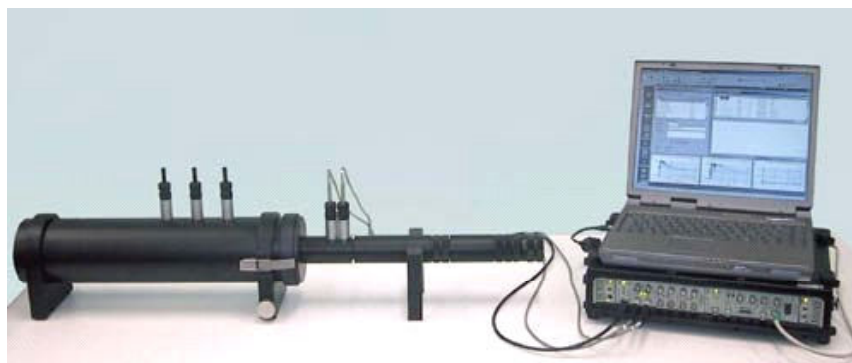
Metoda měření v dozvukové místnosti zajišťuje všesměrový dopad zvukového vlnění, který odpovídá skutečným podmínkám. Nevýhodou je nezbytnost speciální velké místnosti a vzorků velkých rozměrů [2]. Metoda odražené vlny umožňuje určení činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku. Další výhodou je potřeba vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je nutnost zamezení snímání přímého neodraženého zvuku a potřeba podložky s nulovou zvukovou pohltivostí [15].

V experimentální části této práce byla pro měření činitele zvukové pohltivosti vláknenných materiálů použita Dvoulmikrofonová impedanční trubice. Touto metodou se proměřují malé vzorky materiálu. Mezi její nevýhody patří měření dopadu zvuku pouze pro kolmý dopad rovinných zvukových vln, který se v praxi vyskytuje jen výjimečně [2].

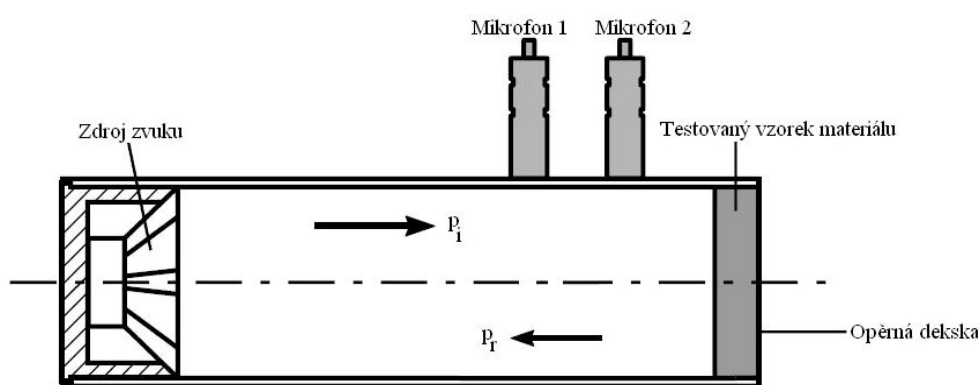
2.3.1 Dvoulmikrofonová impedanční trubice

Dvoulmikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 typu 4206 (obr.10) se používá pro měření akustických charakteristik jako jsou činitel zvukové pohltivosti, činitel zvukové odrazivosti a normovaná impedance ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 6,4 kHz. Tato metoda měření činitele zvukové pohltivosti spočívá v rozkladu širokopásmového stacionárního náhodného signálu do jeho dopadající a odražené složky. Signál je generován uvnitř odporové trubice zdrojem zvuku, odražená složka je ovlivněna akustickými vlastnostmi testovaného vzorku.

Měřicí soustava se sestává z Dvoulmikrofonové impedanční trubice, generátoru náhodného zvukového signálu se zesilovačem, analyzátoru signálů a výpočetní jednotky. Metoda je popsána jak v ISO 10534–2 tak i v ASTM E-1050 [9].



Obr.10: Zařízení k měření činitele zvukové pohltivosti materiálů v závislosti na frekvenci zvuku. Čerpáno z [8].



Obr.11: Průřez Dvoumikrofonové impedanční trubice, kde p_i je dopadající složka akustického tlaku a p_r odražená složka akustického tlaku. Čerpáno z [9].

Princip měření:

Zdroj zvuku je nainstalován na jednom konci impedanční trubice a vzorek materiálu je umístěn na druhém konci (obr.11). Zdroj zvuku vytváří širokopásmové stacionární náhodné zvukové vlny. Ty se šíří jako rovinná vlna v trubici, narazí na vzorek a jsou odraženy.

Mikrofony umístěné na stěně trubice snímají na dvou místech složky dopadajícího p_d a odraženého p_o akustického tlaku, pomocí nichž jsou vypočítány tři frekvenční přenosové funkce, frekvenční přenosová funkce, frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou, frekvenční přenosová funkce související s odraženou složkou. Z těchto získaných hodnot lze určit celkový činitel zvukové odrazivosti R [-] [9]. Činitel zvukové pohltivosti α [-] je pak dán vztahem

$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (19)$$

2.4 Teorie výroby netkaných textilií

2.4.1 Technologie výroby netkaných textilií

Netkaná textilie je vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, zpevněná mechanicky, chemicky nebo termicky. Způsob zpracování je volen v závislosti na zpracovávaném materiálu, na požadovaných výsledných vlastnostech a oblasti použití textilie.

Vláknennou vrstvu je možno kombinovat s plošnými textiliemi (tkaniny, pleteniny) nebo netextilními plošnými útvary (fólie z kovů, plastických hmot apod.). Netkané textilie lze vyrábět z rozsáhlé škály surovin. Mnohdy je to jediná cesta jak daný materiál zpracovat textilní cestou. Existuje rozmanitý okruh použití takto vyráběných materiálů, většinou se však jedná o technické textilie [12]. Netkané textilie jsou také úspěšně využívány v akustických konstrukcích.

2.4.2 Elektrostatické zvlákňování

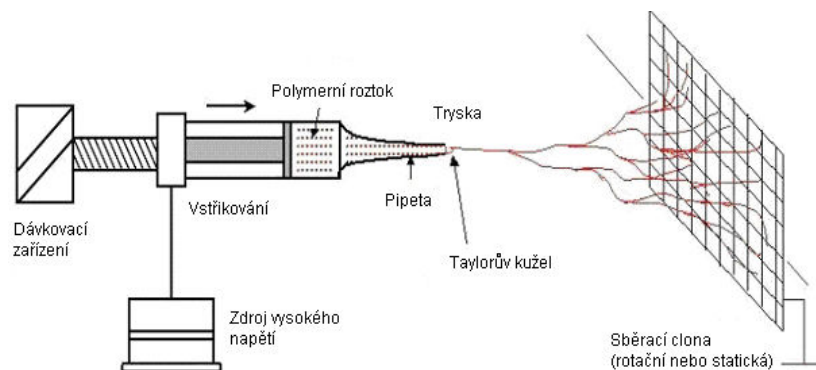
Elektrostatické zvlákňování je metoda výroby vláken o průměru od několika nanometrů do několika mikrometrů a se speciálními vlastnostmi. Je založena na formování roztoku nebo taveniny polymeru ve vlákna působením silného elektrostatického pole. Vzniklá vlákna jsou současně vlivem pole ukládána na podložku, nejčastěji textilní materiál, který se může, ale nemusí, pohybovat po povrchu opačné elektrody.

Nanovlákna jsou vlákna s průměrem od několika nm až po 1 μm . Specifickou vlastností nanovláken je jejich vysoký měrný povrch. Měrný povrch vyjadřuje plochu povrchu vláken ve hmotnostní jednotce materiálu. Nanovlákna mají na svém povrchu mnoho malých pórů [16].

2.4.2.1 Princip elektrostatického zvlákňování

Při elektrostatickém zvlákňování (obr.12) je na kapiláru naplněnou polymerním roztokem či taveninou připojen zdroj napětí. Mezi tryskou a uzemněným kolektorem je

vytvořeno elektrické pole. Roztokem, který je vytlačován tryskou, prochází tedy elektrický proud.



Obr.12: Schéma elektrostatického zvlákňování. Čerpáno z [16].

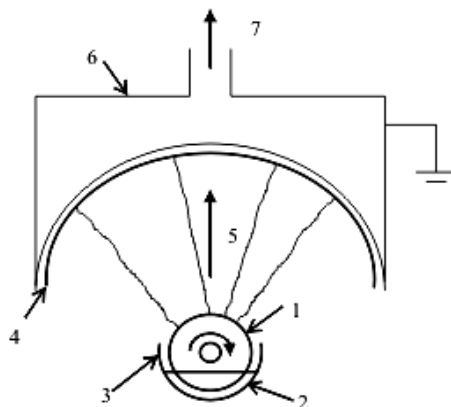
Se zvyšující se intenzitou elektrického pole se povrch roztoku formuje do tvaru, nazývaného Taylorův kužel. Dalším zvýšením intenzity elektrického pole je dosaženo kritické hodnoty elektrické síly, která je schopna překonat povrchové napětí a viskoelastické síly na povrchu polymerního roztoku a tak dojde k vytrysknutí elektrizované kapaliny z hrotu Taylorova kužele a jejímu směřování k uzemněnému kolektoru. Současně dochází k prodlužování vytrysklého proudu kapaliny, který může ale nemusí, být doprovázen větvením výtrysku. Po odpaření rozpouštědla jsou vlákna ukládána na uzemněný kolektor, kde vzniká pavučina vzájemně propojených nanovláken [13].

Při zvlákňování polymerní taveniny je kapilára naplněna polymerní taveninou o teplotě od 220 do 290 °C, dle druhu polymeru. Proces probíhá ve vakuu a během něj nedochází k odpaření rozpouštědla, ale ke ztuhnutí taveniny.

Zařízení na obr.12 je pouze jednou z variant různých typů zařízení pro elektrostatické zvlákňování. V některých případech je tryska umístěna vertikálně a k vytlačení roztoku je použito gravitační síly. Tryska může být také nakloněna pod definovaným úhlem, což umožňuje kontrolovat průtok roztoku tryskou. Zařízení se často liší různými variantami uzemněného kolektoru, na který jsou vlákna ukládána. Většinou je však kolektor tvořen plochou kovovou deskou či sítí. Nanovlákná vyrobená na těchto zařízeních jsou ve formě nanovláknenné vrstvy s náhodně uspořádanými vlákny. Existuje však několik variant zařízení, která produkují jednotlivá nanovlákná, nebo nanovláknenné jednoosé svazky [14].

2.4.2.2 Metoda „Nanospider“

Tato metoda byla vyvinuta na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Zařízení (obr.13) je patentováno v ČR [11].



Obr.13: Schéma zařízení “Nanospider”. 1 je otáčivý kovový válec spojený se zdrojem napětí, 2 je zvlákňovaný roztok, 3 je zásobní nádoba, 4 je podkladová vrstva, 5 naznačuje směr tvorby nanovláken, 6 je uzemněná sběrná clona, 7 je odsávání vzduchu. Čerpáno z [11].

Nádobka válcovitého tvaru je naplněna polymerním roztokem a uvnitř je umístěn kovový válec napájený stejnosměrným proudem. Vrstva polymerního roztoku ulpívá na povrchu otáčejícího se válce. Při samotném zvlákňování je povrch válce pokryt velkým množstvím malých Taylorových kuželů. Nanovlákná jsou ukládána na podkladovou vrstvu. Vytváření nanovláken je ještě podpořeno odsáváním ve směru tvorby nanovláken.

2.4.3 Polyvinylalkohol

Pro potřeby této práce bylo využito polymerního roztoku polyvinylalkoholu k výrobě nanovláknenných vrstev technologií elektrostatičkého zvlákňování.

Polyvinylalkohol (PVA) lze připravit hydrolýzou nebo alkoholýzou polyvinylacetátu. Přímá syntéza z monomeru není možná. Vinylalkohol je nestabilní sloučenina a přechází ve stabilnější formu – acetaldehyd.

Zvolením různé koncentrace katalyzátoru, reakční teploty a reakčního času lze vyrobit plně nebo částečně hydrolyzovanou formu PVA. Podle stupně hydrolyzy lze získat část acetátových skupin. Stupeň hydrolyzy má vliv na vlastnosti polymeru.

Lineární makromolekuly s polárními hydroxylovými skupinami jsou navzájem poutány vodíkovými můstky. Část hmoty je v krystalickém stavu. Podíl krystalické fáze se zvyšuje se stoupajícím stupněm hydrolyzy. Vlastnosti polyvinylalkoholu jsou značně závislé na polyvinylacetátu, ze kterého je PVA vyroben a na metodě přípravy. Fyzikální vlastnosti jsou závislé na stupni hydrolyzy, na obsahu vody, na molekulové hmotnosti. Teplota skelného přechodu (T_g) polyvinylalkoholu je 70 - 85 °C a teplota tání 220 až 240 °C.

Sítováním polyvinylalkoholu lze snížit jeho rozpustnost ve vodě a zlepšit mechanické vlastnosti. Polyvinylalkohol je nejčastěji zesítován formaldehydem nebo účinkem kyselin (např. kyselinou polyakrylovou) [17].

2.5 Teoretické poznatky o pohlcování zvuku

Modely pro výpočet odhadu hodnoty činitele zvukové pohltivosti vytvořené na základě experimentů a teoretických studií různých principů pohlcování jsou popisovány v pracích řady autorů. Jsou známy teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování různých materiálů porézních či neporézních, textilních či netextilních.

2.5.1 Využití porézních a vláknenných materiálů v oblasti zvukové pohltivosti

Významnou prací byla studie C. Zwikkera a C. W. Kostena [18] zabývající se šířením zvuku porézním flexibilním prostředím. Autoři pohlíželi na porézní médium jako na směs dvou fází, vzduchu a pevného materiálu, které reagují rozdílně na zvukovou vlnu. M. E. Delany a E. N. Bazley ve své práci [19] prezentují výsledky výzkumu akustických vlastností řady vláknenných absorpčních materiálů.

Parametry běžně používané k popisu šíření vlny v porézních materiálech v závislosti na jejich mikrostruktuře pochází z modelu průměru ideálního kapilárního póru. V práci K. Attenborougha [20] jsou zhodnoceny teorie, které využívají tyto parametry a

dále jsou diskutovány jejich omezení pro aplikaci na šíření v pružném, vlákenném prostředí. Je představena rozptylová analýza, která byla zatím aplikována jen na jednoduchý model paralelních, stejných vláken ve vzduchu. Její použití je rozšířeno, proto aby mohla být vyvozena řada akustických parametrů pro více reálné popisy vlákenného modelu.

Šíření zvuku vlákennými materiály bylo analyzováno použitím zobecněné teorie akustického šíření v porézním médiu. Byly odvozeny nezbytné konstanty z idealizovaného modelu nahromaděných válců. Autoři shledali, že velikost a orientace vláken jsou hlavní ovlivňující faktory [21].

Shoshani a Yakubov navázali na práci C. Zwikkera a C. W. Kostena. Použili model pro šíření zvuku porézním flexibilním médiem prezentovaný v práci [18] pro numerický výpočet charakteristik netkaných vlákenných pavučin. Výsledky měly sloužit jako návod pro optimální návrh akustických elementů vyrobených z textilních materiálů [22].

Výrobek zhotovený ze speciálně tkané struktury, která je vysoce porézní, je použit jako zvukově absorpční závěs. Dvojitá stěna závěsu byla navržena pro zlepšení vlastností jak ve zvukové pohltivosti tak i světelné izolaci. Jedna vrstva byla vyrobena ze 100% bavlny, zatímco další byla vyrobena ze směsi bavlna/polyester v poměru 35:65. Tyto dvě vrstvy byly odděleny vzduchovým prostorem. V práci byl studován účinek vzduchového prostoru za a/nebo mezi vrstvami závěsu na činitele pohltivosti [30].

Práce [23] J. F. Allarda a Y. Champoux navazuje na práci M. E. Delanyho a E. N. Bazleye a poskytuje nové rovnice, které jsou na rozdíl od původních rovnic platné i v nízkých frekvencích. Použitý model navrhuje závislost šíření zvuku ve vlákenných materiálech na průměru vláken a na měrné hmotnosti materiálu.

P. P. Narang ve své práci [31] prezentuje empirickou rovnici využívající parametr odporu proudění ve vztahu k počtu vláken v objemu materiálu pro predikci činitele pohltivosti materiálů z polyesterových vláken. Rovnice je vyvinuta z empirické predikční rovnice pro skleněná vlákna. M. Garai a F. Pompoli ve své práci [32] vyvinuli empirický model pro predikci odporu proudění, akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti materiálů z polyesterových vláken různých parametrů.

V práci N. Voronina [24] bylo experimentálně zkoumáno akustické chování vlákenných materiálů s flexibilní konstrukcí. Charakteristická impedance a konstanty šíření byly měřeny pro velmi slabá skleněná vlákna o různém průměru a o různé měrné hmotnosti. Porovnáním experimentálních výsledků byl empiricky odvozen vztah mezi akustickými parametry a fyzikálními hodnotami charakterizující vnitřní střední

makrostrukturu. Tento model může sloužit k predikci hodnot akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti materiálových vrstev, za předpokladu, že jsou známy hodnoty průměrů vláken a měrná hmotnost.

Sledováním tepelné a viskózní difúze v porézních médiích jako relaxačních procesů je vyvinut jednoduchý model pro šíření zvuku v těchto materiálech v práci D. K. Wilsona [33]. Autor porovnává tři existující modely: Delany-Bazleyovy empirické rovnice, Biot-Allardův mikrostrukturální model, a Champoux-Stinsonův zobecněný mikrostrukturální model.

V článku Y. Leea a Ch. Joa [10] je zkoumán činitel zvukové absorpce netkaných textilií vyrobených z recyklovaného polyesteru za účelem náhrady konvenčně používaných materiálů jako jsou skelná vata a minerální plst'. Použití těchto textilií má ve srovnání s konvenčními zvukovými absorbéry mnoho výhod. Jedná se převážně o snížení výrobní ceny, dobrou manipulaci a ochranu životního prostředí. Činitel zvukové absorpce zmiňovaných textilií byl určen pomocí dvoumikrofonové impedanční měřicí trubice. Dále byl stanoven vztah mezi hodnotami naměřené akustické pohltivosti a parametry netkané textilie zahrnující vlastnosti vláken a rouna.

2.5.2 Využití obkladů založených na rezonančním principu

2.5.2.1 *Metoda návrhu membránového typu absorbéru*

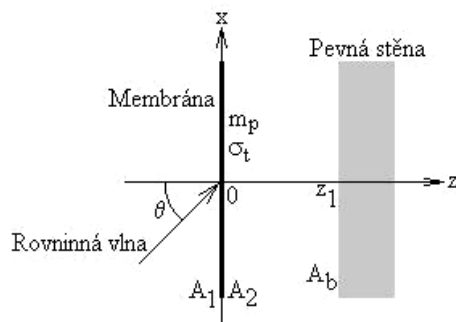
K. Sakagami, M. Kiyama, M. Morimoto a D. Takahashi se ve své práci [29] zabývají teoretickou studií zvukově absorpčních charakteristik membránového zvukového absorbéru.

Membránový absorbér je používán pro pohlcování zvuku o nízkých frekvencích. Široká rozmanitost požadavků z oblasti stavebnictví vyžaduje potřebu studií akustických vlastností membrán a vývoj nových membránových materiálů.

Membránový absorbér je obvykle umísťován paralelně s pevnou stěnou. Mezi pevnou stěnou a membránou je vytvořena vzduchová mezera, která podporuje absorpční vlastnosti systému.

V této práci jsou prezentovány úvahy o zvukově absorpčních charakteristikách a mechanismech membránové absorpce. Řešení studie se zaměřuje na určení příspěvku každého prvku membránového absorbéru. Účinky parametrů systému zvukové pohltivosti

byly diskutovány na základě vypočtených výsledků. Bylo shledáno, že největší příspěvek podává vzduchová mezera. Dále je v článku uvedena metoda k predikci frekvence absorpčních vrcholů a hodnotě vrcholů při šikmém dopadu zvuku na membránový absorbér. Metoda může být využita pro návrh speciálních membránových nebo deskových absorbérů.



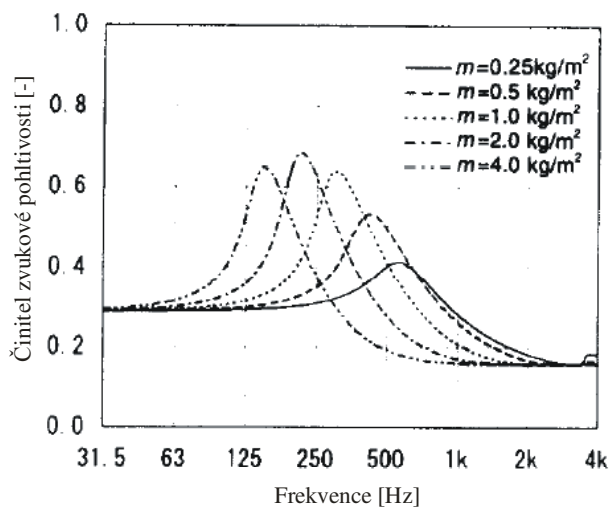
Obr.14: Geometrie membrány se vzduchovou mezerou. Membrána, jejíž plošná hmotnost a tahové napětí jsou m_p a σ_t , je umístěna paralelně k pevné stěně, a vzduchová mezera hloubky z_1 je formována mezi membránou a pevnou stěnou, povrchy membrány a pevné stěny mají specifické akustické admitance A_1 (pro přední stranu membrány), A_2 (pro zadní stranu membrány) a A_b (pro pevnou stěnu).

Tato práce vychází z představy znázorněné na obr.14. Membrána leží v rovině xy , paralelně s pevnou stěnou ve vzdálenosti $z = z_1$. Membrána, jejíž plošná hmotnost a tahové napětí jsou m_p a σ_t , vibruje pod dopadající rovinnou vlnou o amplitudě jednotkového akustického tlaku s úhlem dopadu θ . Vstupní strana a výstupní strana membrány a povrch pevné stěny mají specifickou akustickou admitanci A_1 , A_2 a A_b . Specifická akustická admitance je podle [41] definována jako poměr akustické rychlosti částice ku akustickému tlaku na pohltivý materiál krát součin měrné hmotnosti a rychlosti zvuku.

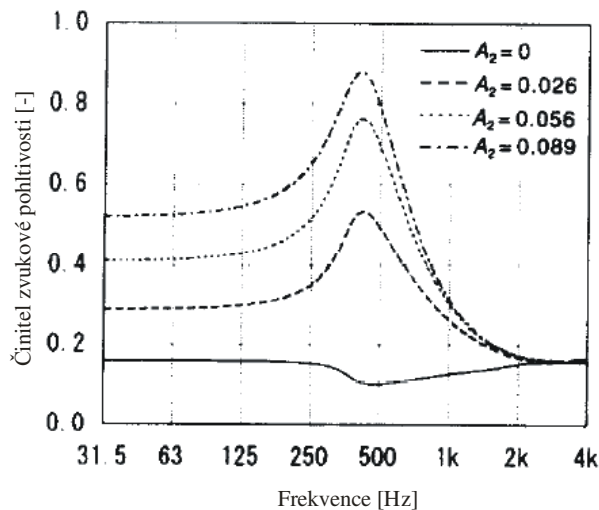
Činitel pohltivosti vyjadřuje množství absorbované energie. Zahrnuje ztráty energie různých druhů, které jsou způsobeny různými mechanismy v různých částech absorpčního systému (proto jsou ztráty počítány k povrchu na vstupní straně, na výstupním povrchu, a na povrchu pevné stěny).

Na obr.15 jsou zobrazeny vypočítané výsledky průměrného činitele pohltivosti při prostorovém dopadu rovinné vlny (průměr z $0-78^\circ$ úhlu dopadu) pro membrány o různé plošné hmotnosti m_p se vzduchovou mezerou mezi pevnou stěnou a membránou. Frekvence vrcholu pohltivosti, který je způsoben rezonancí systému hmota-pružina (hmota

membrány s tuhostí vzduchové mezery) se posunuje k nižším hodnotám s rostoucí plošnou hmotností. Maximální pohltivost je zjištěna pro plošnou hmotnost $m_p = 2,0 \text{ kg.m}^{-2}$.



Obr.15: Účinek plošné hmotnosti membrány m_p na průměrný činitel pohltivosti při prostorovém dopadu rovinné vlny: $m_p = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0$ a $4,0 \text{ kg.m}^{-2}$, $\sigma_t = 1,0 \text{ N.m}^{-1}$, $A_1 = A_2 = 0,026$, $A_b = 0$.



Obr.16: Účinek specifické akustické admitance zadní strany membrány A_2 na průměrný činitel pohltivosti při prostorovém dopadu rovinné vlny: $A_2 = 0; 0,026; 0,056$ a $0,089$. Další parametry jsou stejné jako na obr.2.

Různá pohltivost z důvodu změny specifické akustické admitance povrchu za membránou A_2 je ukázána na obr.16. Pohltivost stoupá ve frekvencích pod 2 kHz s rostoucí A_2 , ale ve frekvencích nad 2 kHz nedochází k žádné změně. Tato skutečnost

naznačuje, že pohltivost ve vysokých frekvencích je ovlivněna hlavně admitancí na vstupní straně povrchu membrány A_1 než na výstupní straně A_2 .

Bez účinku pohltivosti vzduchové mezery, $A_2 = A_b = 0$, ukazuje křivka pohltivosti malý pokles v rezonanční frekvenci. Tudíž, efekt pohltivosti vzduchové mezery je nutný k získání vysoké pohltivosti membrány. Membrána samotná nemůže absorbovat zvuk dobře.

2.5.2.2 Další studie absorbérů rezonančního typu

Porézní a vláknenné materiály jsou využívány pro různorodé aplikace k absorpci akustické energie ve středních a vysokých frekvencích nad zhruba 200 Hz. Existují však případy, kde jejich nechráněnost a hrubý povrch znamená jisté nevýhody s ohledem na požadavky na hygienu a čistotu. Pro střední a nízké frekvence, které by vyžadovaly poměrně velkou tloušťku a váhu absorbéru, se objevuje potřeba akustických komponent, které jsou výhradně tvořeny rovnými a hladkými membránami. V práci [25] je prezentován zvukový absorbér rezonančního typu z tenkých i když poměrně tuhých kovových nebo plastových membrán. Absorpce vibrační energie zesílené zvukovými vlnami dopadající na akustický obklad je způsobena výhradně třecími silami. Konstrukce zvukového absorbéru nevyžaduje připojení dalšího porézního materiálu, proto aby absorbér pracoval efektivně v širokém pásu středních a nízkých frekvencí. Struktura včelí plástve, kterou formuje pevný rám akustického absorbéru, vytváří poměrně lehkou a stabilní konstrukci elementu pro akustické místnosti a průmyslové aplikace, kde by mohlo dojít ke znehodnocení absorbéru prachem ze vzduchu nebo znečištění životního prostředí tlumícím materiálem.

Absorpce nízko-frekvenčních složek hluku je obtížná a drahá využitím tradičních metod, které používají porézní materiály a to z důvodu požadované tloušťky. V práci J. Leea a G. W. Swensona [35] je navržen model kompaktní a účinné zvukově absorpční struktury zkonstruované bez porézního materiálu v podobě jednoduchého rezonátoru, který je tvořen panelem s perforovanými malými otvory a jeho zvuková pohltivost je ještě podpořena vzduchovým prostorem. Výsledky testu ukázaly, že vibrace panelu ovlivňují akustické vlastnosti struktury.

Práce [26] vypovídá o akustických vlastnostech absorpčních elementů, které se skládají z kovové membrány a vykazují dobrou zvukovou pohltivost v nízkých a středních

frekvencích. Je zde ukázáno chování absorpčních elementů reprezentovaných hlavně Helmholtzovými rezonátory a deskovými rezonátory. Parametry jednotlivých rezonátorů jsou určeny jak teorií tak i experimentem a slouží jako vstupní data pro zjednodušený výpočtový model, který může být použitý jako pomocný prostředek pro navrhování membránových absorbérů využívaných pro tlumení hluku.

V práci N. Voronina [27] byly experimentálně studovány akustické vlastnosti syntetických filmů, které jsou užívány v některých absorbérech jako povlak. Standardní metodou pro neprostupné a perforované povlaky byly určeny numerické hodnoty impedance filmů o různé tloušťce a fyzikálních parametrech. Ve studii bylo představeno porovnání experimentálních výsledků některých empirických rovnic pro impedanci filmu z hlediska bezrozměrných fyzikálních parametrů. Bylo prokázáno, že tyto rovnice vyhovují i pro další typy povlaků jako jsou fólie a papír. Empirické rovnice mohou být použity k predikci hodnot činitele zvukové pohltivosti pro porézní vrstvy mající čelní stěnu z filmu.

J. Kang a H. V. Fuchs ve své práci [28] prezentují teoretickou metodu pro predikci absorpce konstrukcí, kterou tvoří kombinace membránového absorbéru a děrovaného panelu (např. textilie ze skleněných vláken nebo mikroperforovaná membrána namontovaná přes vzduchotěsnou mezeru). Základní myšlenkou teorie je nahlížet na volnou tkanou textilií nebo mikroperforovanou membránu jako na paralelní spojení membrány a otvorů.

Zvukově pohltivý materiál aplikovaný na stropy tvořený nepropustnou PVC membránou je zkoumán v práci [34]. Měření absorpčních charakteristik bylo provedeno pro několik hloubek vzduchové mezery. Dále byl také proveden experiment, kdy byly do vzduchové mezery postupně vloženy dva různé materiály pohlcující zvuk. Teorie i experiment ukázaly, že zkoumaný absorbér pohlcuje zvuk na rezonančním principu. Zvuková pohltivost se mění výrazně s frekvencí a je velmi závislá na charakteristice a postavení materiálu absorbujícího zvuk ve vzduchové mezeře.

Práce [36] popisuje tvarovaný mikroperforovaný zvukový absorbér a metody zhotovení takového absorbéru. Zvukový absorbér je vyráběn z polymerního, většinou plastického, filmu, který má na celém nebo na části povrchu vytvořenou sérii mikroperforování. Film je formován do požadovaného třídímenzionálního tvaru. Výška je volena tak, aby poskytla požadovanou hloubku vzduchové mezery, která ovlivňuje spektrum zvukové pohltivosti.

Metoda k predikci činitele zvukové pohltivosti membránových absorbérů složených z jednoduché nebo dvojité destičky membránové struktury různých uspořádání je prezentována v práci [37]. Na základě numerických experimentů je navrženo, jak zlepšit účinky zvukové pohltivosti dvouvrstvých membránových absorbérů s propustnými a nepropustnými vrstvami. Autoři navrhuji metodu predikce zvukové pohltivosti na základě skutečnosti, že zvuk se vyskytuje z obou stran absorbéru a část energie je v absorbéru rozptýlena a může být dána rozdílem činitele zvukové pohltivosti a prostupnosti.

Z. Congyun a H. Qibai v práci [38] navrhli teoretický model pro výpočet činitele zvukové pohltivosti vícevrstevných absorbérů složených z perforovaných desek, vzduchové mezery a porózního materiálu. Nejprve je použitím elektro-akustické analogie vypočtena akustická impedance pro vícevrstvé absorbéry složené buď z perforovaných desek a vzduchových mezer nebo perforované desky a porózního materiálu. Následně je vypočtena akustická impedance pro vícevrstvé absorbéry složené z perforovaných desek, vzduchových mezer a porózních materiálů. Nakonec jsou uskutečněny teoretické výpočty činitele pohltivosti tří typů vícevrstevných absorbérů složených z různých materiálů obsahující perforované desky.

V práci [39] je podrobně studována zvuková absorpce flexibilních zakřivených mikroperforovaných panelů s jednoduchou nebo dvojitou vrstvou, jejichž absorpce zvuku je podpořena vzduchovou dutinou. Byl vyvinut teoretický model, který je založen na klasické deskové rovnici spojené s rovnicí akustické vlny pro predikci zvukové absorpce. Tento model bere v úvahu jak symetrickou tak i nesymetrickou strukturu akustické odezvy. Použitím elektro-akustického analogického přístupu je vyvinut další model, který bere v úvahu pouze jednotlivou strukturu a akustické módy (kmitání). Absorpce flexibilního mikro-perforovaného panelu může být dále zlepšena nastavením jeho zakřivení, tím se rezonanční frekvence přiblíží k sobě. Jsou studovány účinky různých parametrů na absorpci jako jsou okrajová podmínka, úhel dopadu, a zakřivení.

3 Experimentální část

3.1 Cíl

Podstatou této práce byla studie průběhu chování činitele zvukové pohltivosti a zjišťování rezonančních frekvencí nanovrstvy podrobené působení zvukových vln v určitém rozsahu frekvence. Měřené údaje byly zjišťovány při změnách parametrů absorpčního členu.

3.2 Úkoly

Aby bylo dosaženo stanoveného cílu, musely být splněny tyto úkoly:

- 1) vyrobit nanovlákněné vrstvy o různé plošné hmotnosti,
- 2) použít vyrobené vrstvy ke zhotovení vzorků pro měření v impedanční trubici (vzorek se skládá z nanovrstvy napnuté mezi dvěma papírovými kroužky),
- 3) postupně vkládat jednotlivé vzorky do měřicího zařízení a proměřovat je v různé vzdálenosti od odrazivé stěny,
- 4) umisťovat do měřicí trubice několik vzorků najednou a zjišťovat měřený parametr,
- 5) proměřit samotnou nanovlákněnou vrstvu (bez papírového prstence) v různé vzdálenosti od odrazivé stěny,
- 6) změřit požadovaný parametr také pro samotný papírový prstenec v různé vzdálenosti od odrazivé stěny.

3.3 Výroba membrány

Pro výrobu membrány byla použita nanovlákněná vrstva zhotovená elektrostatickým zvlákněním směsi 16 %-ního roztoku polyvinylalkoholu s přídavkem 40 %-ního glyoxalu, 85 %-ní kyseliny fosforečné a vody (viz. Příloha č.5). Proces elektrostatického zvláknění nanovláken probíhal na laboratorním zařízení Nanospider. Plošná hmotnost zvlákněné vrstvy nanovláken byla přímo ovlivňována a regulována

odtahovou rychlostí podkladového materiálu. Tímto způsobem byly vytvořeny čtyři různé plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy, a to odtahovou rychlostí navazující teplovzdušné komory s hodnotami 25 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,4 m/min), 12,5 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,2 m/min), 6,25 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,1 m/min) a 3,12 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,05 m/min).

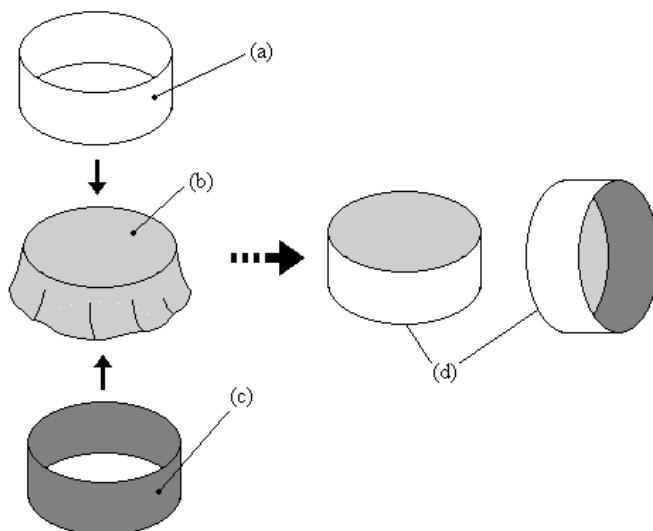
Nanovláknenná vrstva zvlákněná na podkladový pečicí papír byla kontinuálně vedena z Nanospideru přímo do teplovzdušné komory k částečnému procesu síťování za teploty 140 °C při výše uvedených odtahových rychlostech. Použití pečicího papíru, jako podkladové vrstvy, značně usnadnilo snímání nanovrstvy, což bylo důležité pro další zpracování této vrstvy.

3.4 Výroba vzorku

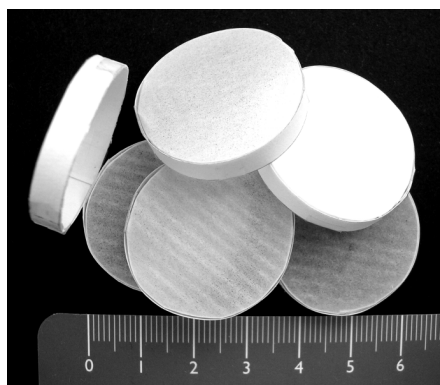
Nanovláknenná vrstva byla vkládána mezi dva papírové kroužky o výšce 5 mm. Vnější kroužek dosahoval průměru 29 mm (délka proužku pro vytvoření prstence = 91 mm + překlad) proto, aby přesně zapadal do trubice měřicího přístroje. Vnitřní kroužek byl vytvořen z proužku přibližně o 2 mm kratšího než vnější kroužek.

Nejprve byly na vnější stranu vnitřního kroužku v několika místech podél celého obvodu nalepeny malé kousky oboustranné lepicí pásky. Poté byla přes tento vnitřní kroužek položena vyrobená nanovrstva a přichycena k němu pomocí použité lepicí pásky. Pak byl vnější kroužek nasunut přes vnitřní kroužek (obr.17, 18). Oba kroužky byly k sobě asi ve třech místech na spodním okraji zachyceny pomocí jednostranné lepicí pásky, proto aby se zabránilo jejich posuvu vůči sobě.

Použití oboustranné lepicí pásky umožnilo zachycení nanovrstvy na vnitřní kroužek v téměř vypnutém stavu a také zjednodušení dalších kroků výroby vzorku. Při následné manipulaci a při samotném měření nedocházelo k posouvání či vysouvání nanovrstvy z kroužků.



Obr.17: Výroba vzorku. Mezi papírové kroužky (a), (c) je umístěna nanovláknenná vrstva (b). (d) znázorňuje vytvořený vzorek pro měření.



Obr.18: Vzorky připravené pro měření zvukové pohltivosti pomocí dvou mikrofonové impedanční trubice.

3.5 Použité měřicí zařízení

Měření všech vyhotovených vzorků probíhalo pomocí dvou mikrofonové impedanční trubice typu 4602 (viz. Teoretická část odst. 2.3), umístěné na Katedře strojů průmyslové dopravy. Byly použity vzorky s průměrem 29 mm.

Z důvodů částečné eliminace chyby měření, způsobené manipulací se vzorky, bylo proměřeno od každého vzorku sedm kusů. Získané hodnoty ze všech sedmi měření byly pomocí měřicího softwaru převedeny a graficky zpracovány v programu Excel. Z grafů je

zřetelně vidět změna činitele zvukové pohltivosti v závislosti na měnící se frekvenci a naměřené výsledky lze pomocí jednotlivých grafů velice přehledně porovnávat.

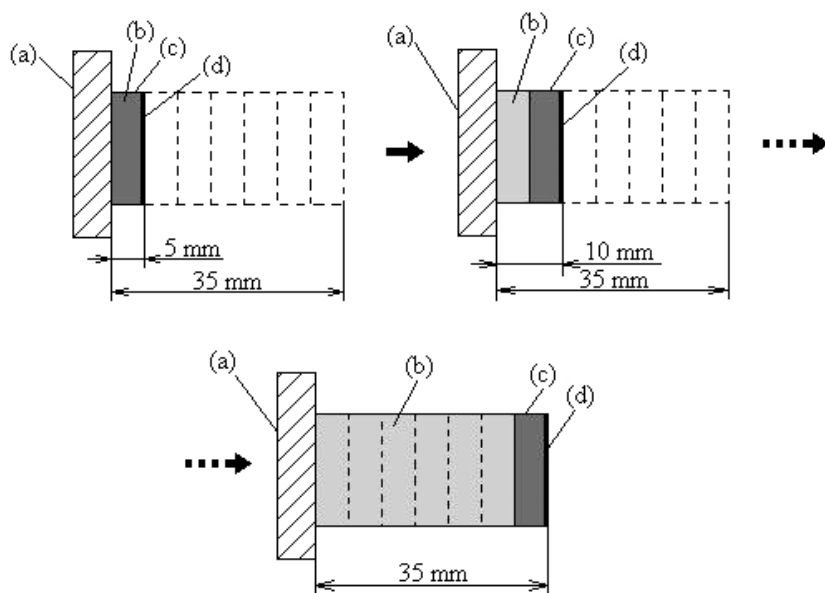
Přístroj je před každým měřením kalibrován pro danou absorpční soustavu.

3.6 Postup měření

3.6.1 Proměřování absorpčního vzorku v různé vzdálenosti od odrazivé stěny

Zhotovený rezonanční prvek (obr.18) byl vložen do měřicí aparatury. Odrazivá stěna byla nastavena do vzdálenosti 5 mm od nanovlákněné vrstvy. Tato vzdálenost byla zajištěna výškou papírového prstence. Postupně byla vzdálenost mezi odrazivou stěnou a nanovrstvou 7 krát změněna po 5 mm do celkové vzdálenosti 35 mm (obr.19).

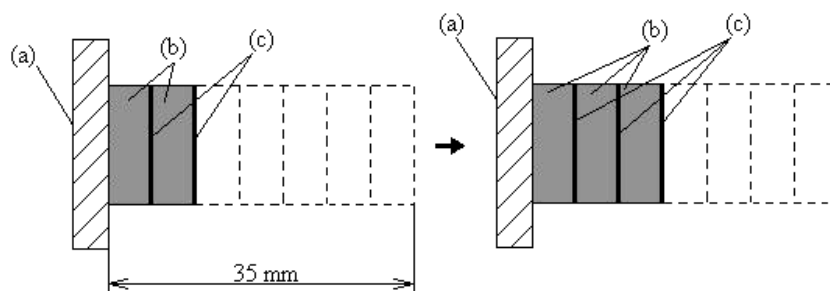
Tato vzdálenost byla regulována pomocí pohyblivého pístu, který představuje odrazivou stěnu. Změnou nastavení vzdálenosti pístu se mění velikost vzduchového polštáře, který vyplňuje prostor od odrazivé stěny až po nanovrstvu.



Obr.19: Postup měření vzorků v různé vzdálenosti od odrazivé stěny. (a) je odrazivá stěna, (b) vzduchová mezera (vyplňuje prostor mezi odrazivou stěnou a nanovlákněnou vrstvou), (c) vzorek, tvořený nanovlákněnou vrstvou umístěnou mezi dva papírové kroužky, (d) nanovlákněná vrstva.

3.6.2 Vrstvení absorpčních vzorků směrem od odrazivé stěny

Vyrobené absorpční prvky (obr.18) byly postupně za sebou vkládány do měřicí aparatury v počtu od jednoho do sedmi kusů. První vzorek byl umístěn do vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny. Pokud byly měřeny dva vzorky, byl první umístěn do vzdálenosti 5 mm a druhý ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny. Takto se postupně pokračovalo až bylo v trubici 7 vzorků a zaplnil se tak prostor do vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny (obr.20). Vzduchová mezera mezi jednotlivými nanovrstvami byla vždy 5 mm.

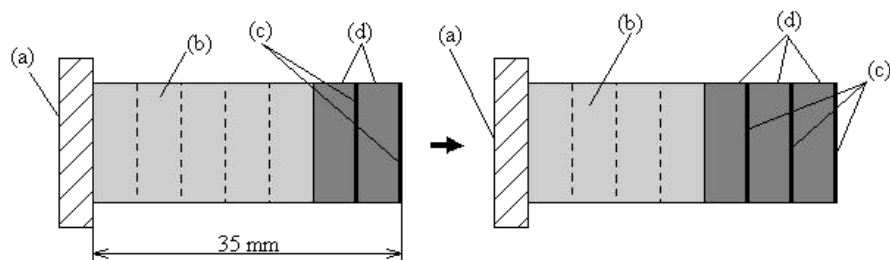


Obr.20: Vrstvení vzorků za sebou směrem od odrazivé stěny. (a) je odrazivá stěna, (b) jsou jednotlivé vzorky postupně kladené za sebou, kde prostor mezi jednotlivými nanovláknými vrstvami vyplňuje vzduchová mezera. (c) jsou nanovlákné vrstvy.

3.6.3 Vrstvení absorpčních vzorků směrem k odrazivé stěně

Absorpční vzorky (obr.18) byly postupně od jednoho do sedmi kusů vkládány za sebou do měřicí aparatury. Vrstvení jednotlivých prvků následovalo opačným směrem než probíhalo v předchozím případě (odst. 3.6.2). To znamená, že první vzorek byl umístěn do vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny. V případě měření dvou prvků, byl první umístěn ve vzdálenosti 35 mm a druhý ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny, atd. (obr.21).

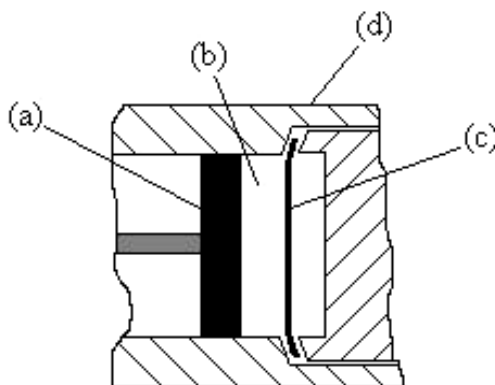
Vzduchová mezera mezi jednotlivými nanovrstvami byla vždy 5 mm. Vzduchem byla vyplněna i mezera mezi odrazivou stěnou a poslední nanovrstvou. Tato vzdálenost se s přibývajícimi vzorky zmenšovala.



Obr.21: Vrstvení vzorků za sebou směrem k odrazivé stěně. První vzorek (nanovrstva) je umístěn ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny (a). Jednotlivé vzorky (d) jsou postupně kladeny za sebou. Prostor mezi jednotlivými nanovláknými vrstvami vyplňuje vzduchová mezera, stejně tak jako prostor (b) mezi odrazivou stěnou a poslední nanovrstvou. (c) jsou nanovlákné vrstvy.

3.6.4 Měření samotné nanovlákné vrstvy

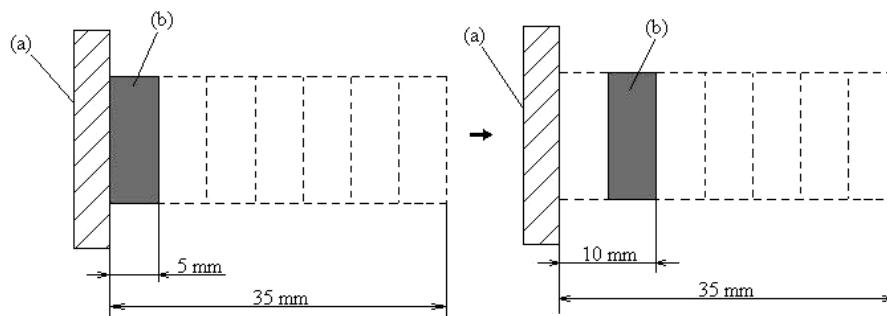
Nanovlákná vrstva byla umístěna mezi dva oddělitelné díly trubice měřícího zařízení (obr.22). Nejprve byla nastavena odrazivá stěna, představována pohyblivým pístem, do vzdálenosti 5 mm od nanovrstvy. Poté byla tato vzdálenost postupně po 5 mm měněna do konečné vzdálenosti 35 mm.



Obr.22: Princip měření samotné nanovlákné vrstvy. (a) představuje odrazivou stěnu, (c) je nanovlákná vrstva přidržována dvěma díly impedanční trubice (d). Prostor mezi měřenou vrstvou a odrazivou stěnou je tvořen vzduchovou mezerou (b). Vzdálenost mezi nanovrstvou a odrazivou stěnou je postupně měněna po 5 mm od počátečních 5 mm do konečných 35 mm.

3.6.5 Měření samostatného papírového kroužku

Samotný papírový kroužek (obr.23) byl instalován do měřicí trubice těsně k odrazivé stěně. Vzdálenost mezi kroužkem a stěnou byla postupně po 5 mm zvětšována až do stavu, kdy vzdálenější okraj kroužku byl umístěn ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny.



Obr.23: Princip měření samotného papírového kroužku. (a) představuje odrazivou stěnu, (b) je papírový kroužek. Vzdálenost mezi vzdálenějším okrajem papírového kroužku a odrazivou stěnou je postupně měněna po 5 mm od počátečních 5 mm do konečných 35 mm.

3.7 Označování vzorků

Označování vzorků různé plošné hmotnosti:

„A“ → vlákenná vrstva vyrobená při odtahové rychlosti 3,12 Hz → odpovídá plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$

„B“ → vlákenná vrstva vyrobená při odtahové rychlosti 6,25 Hz → odpovídá plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$

„C“ → vlákenná vrstva vyrobená při odtahové rychlosti 12,5 Hz → odpovídá plošné hmotnosti $3,1 \text{ g.m}^{-2}$

„D“ → vlákenná vrstva vyrobená při odtahové rychlosti 25 Hz → odpovídá plošné hmotnosti $1,4 \text{ g.m}^{-2}$

Označování různých absorpčních soustav:

„SK“ → nanovláknenná vrstva uchycená mezi papírovými kroužky (viz. odst. 3.6.1)

„BK“ → nanovláknenná vrstva uchycená mezi díly impedanční trubice bez papírového kroužku (viz. odst. 3.6.4)

„VK“ → vrstvení vzorků nanovláknenné vrstvy uchycené mezi papírovými kroužky

„VKO“ → vrstvení vzorků směrem od odrazivé stěny (viz. odst. 3.6.2)

„VKK“ → vrstvení vzorků směrem k odrazivé stěně (viz. odst. 3.6.3)

„K“ → samotný papírový kroužek (viz. odst. 3.6.4)

Vzdálenost od odrazivé stěny:

→ 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm

Počet vrstvených vzorků:

→ 1 – 7 vzorků

Příklad:

„SK – A – 5“ ... absorpční soustava (nanovláknenná vrstva uchycená mezi papírovými kroužky) – plošná hmotnost ($12,6 \text{ g.m}^{-2}$) – vzdálenost nanovrstvy od odrazivé stěny (5 mm)

„VKO – 2 – B“ ... absorpční soustava (vzorky nanovláknenné vrstvy uchycené mezi papírovými kroužky vrstvené směrem od odrazivé stěny) – počet navrstvených vzorků (2 vzorky) - plošná hmotnost ($5,8 \text{ g.m}^{-2}$)

„K – 10“... absorpční soustava (samotný papírový kroužek) - umístění kroužku ve vztahu k odrazivé stěně (10 mm)

3.8 Vyhodnocování grafů

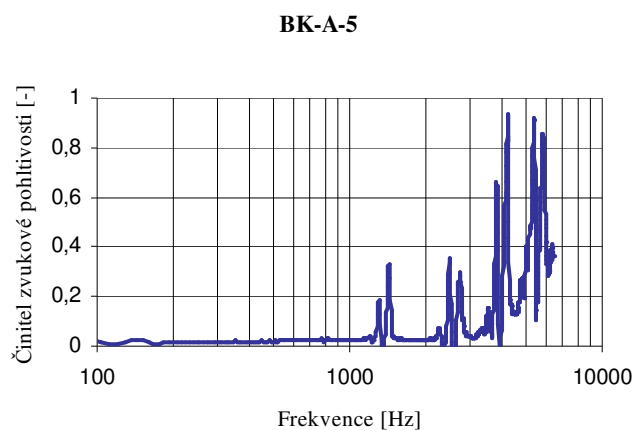
Hodnoty získané měřením absorpčních soustav byly z důvodu větší názornosti zpracovány do grafů. Pro vyhodnocování rezonančních charakteristik byly použity grafy příslušející měření samotné nanovláknenné vrstvy bez papírového kroužku (viz. odst. 3.6.4).

Z grafického znázornění průběhu činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci byly zjišťovány tyto údaje:

- 1) počet rezonančních systémů (označovány: f_{r1}, f_{r2}, \dots),
- 2) počet rezonancí v daných systémech (označovány: f_1, f_2, \dots),
- 3) hodnoty rezonančních frekvencí reálného systému.

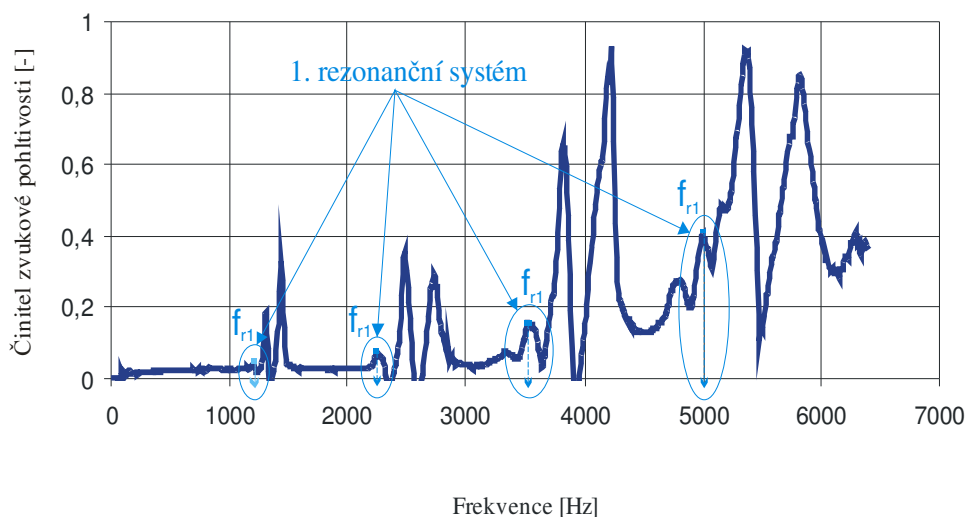
Rezonanční charakteristiky byly vyhodnocovány na základě studie vrcholů, které se vyskytují v naměřených grafech.

Příklad získávání daných údajů z grafů je znázorněn na následujících obrázcích (obr.24-27), které přísluší vzorku nanovlákněné vrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.

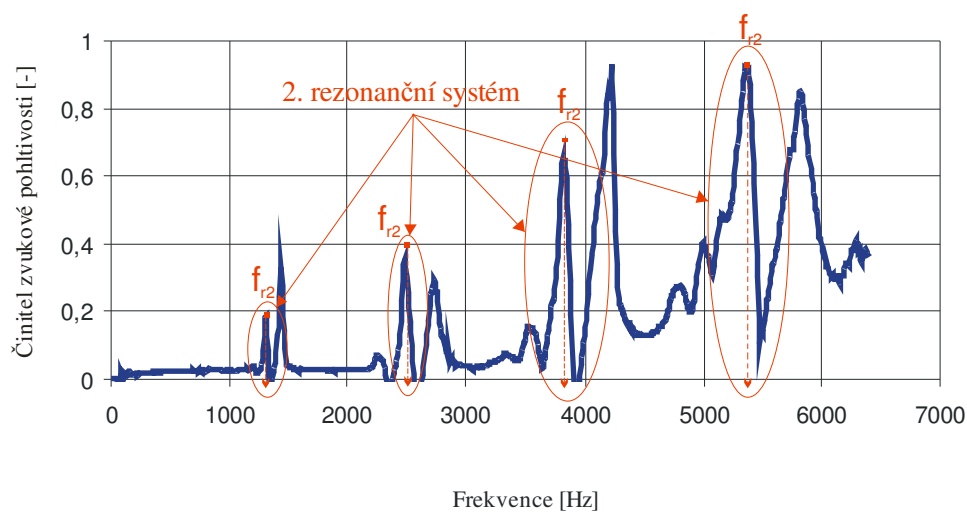


Obr.24: *Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření nanovlákněné vrstvy (bez nosného kroužku) o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.*

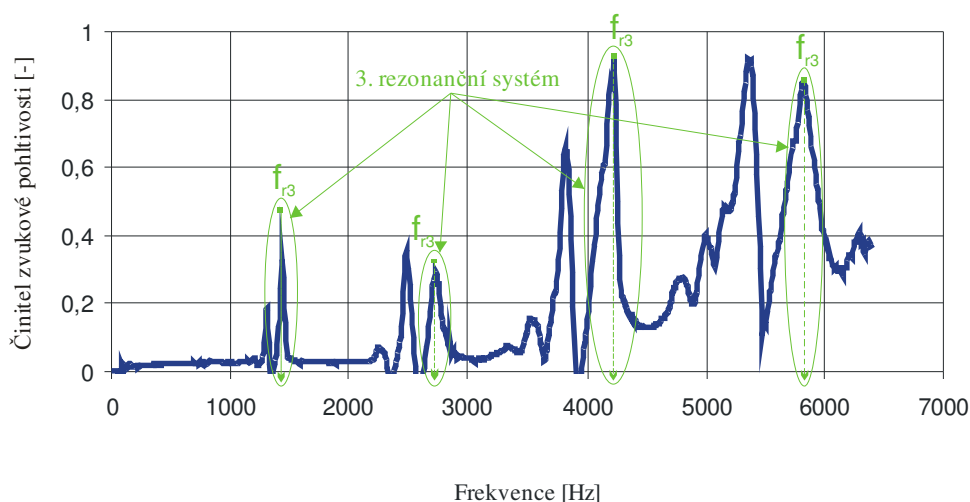
Na křivce (obr.24) je možno vidět dvanáct vrcholů, které se po třech shlukují do čtyř skupin. První vrcholy v každé skupině tvoří dohromady první rezonanční systém (obr.25). Druhé vrcholy v každé skupině představují druhý rezonanční systém (obr.26). A v pořadí třetí vrcholy v každé skupině znázorňují třetí rezonanční systém (obr.27).



Obr.25: Princip odečítání rezonančních frekvencí z grafu - první rezonanční systém pro vzorek BK – A – 5.

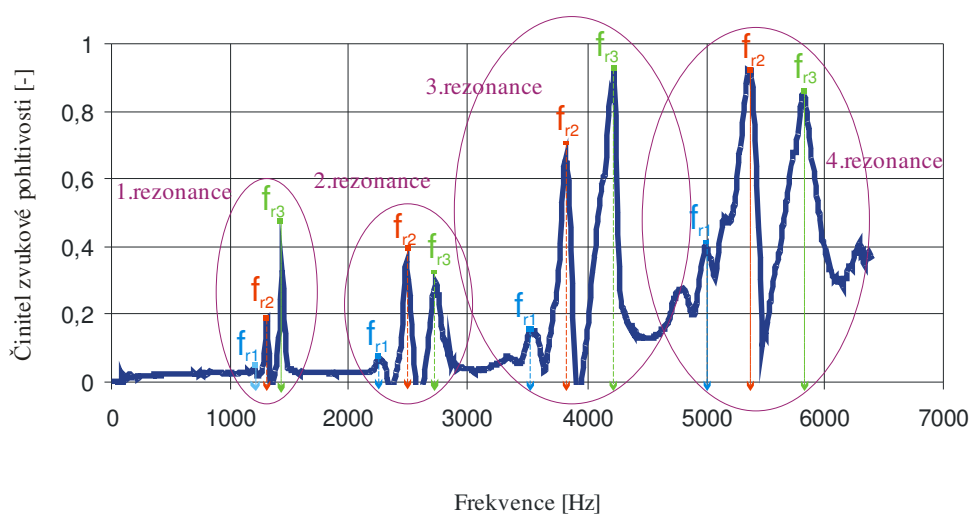


Obr.26: Princip odečítání rezonančních frekvencí z grafu - druhý rezonanční systém pro vzorek BK – A – 5.



Obr.27: Princip odečítání rezonančních frekvencí z grafu - třetí rezonanční systém pro vzorek BK – A – 5.

Vrcholy se shlukují do čtyř skupin. Jednotlivé skupiny představují rezonance. V každém rezonančním systému se tedy projevují čtyři rezonance (obr.28).



Obr.28: Princip odečítání rezonančních frekvencí z grafu – vícenásobná rezonance příslušných rezonančních systémů pro vzorek BK – A – 5.

Z grafů absorpčních soustav s nanovrstvami o plošných hmotnostech 12,6 a 5,8 g.m⁻² byly odečteny hodnoty rezonančních frekvencí. Jednotlivé údaje byly zpracovány do tab. 2-15. K jednotlivým hodnotám rezonančních frekvencí reálného systému byly také vypočteny hodnoty teoretických rezonančních frekvencí.

Odvození vztahů pro výpočet rezonančních frekvencí:

Pro výpočet vlastních frekvencí membrány podle vzorce (16) je zapotřebí nejprve stanovit rychlost příčné vlny šířící se na membráně c_M . To nelze bez znalosti radiálně působící napínací síly ν , která vyvolává napnutí membrány na kruhovém rámu. Veličiny c_M a ν nejsou známy, proto vzorec (16) nelze pro výpočet aplikovat. Jeho úpravou (viz. následující text) však byly získány vzorce, které jsou pro výpočet použity.

Pro stanovení úhlové rychlosti platí vztah

$$\omega_i = 2\pi f_i, \quad (20)$$

kde f_i je frekvence kmitů. Dosazením do vztahu (16) je možno rovnici přepsat jako

$$2\pi f_i = \frac{a_i c_M}{r}. \quad (21)$$

Po úpravě tohoto vztahu je možno vyjádřit

$$f_i = \left(\frac{a_i c_M}{2\pi r} \right) \Rightarrow \frac{f_i}{a_i} = \frac{c_M}{2\pi r}. \quad (22)$$

Poměr $\frac{c_M}{2\pi r}$ je konstantní, neboť poloměr membrány ani rychlost šíření vlny membránou se nemění. Platí tedy

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_2}{a_2} = \frac{f_3}{a_3} = \frac{f_4}{a_4}. \quad (23)$$

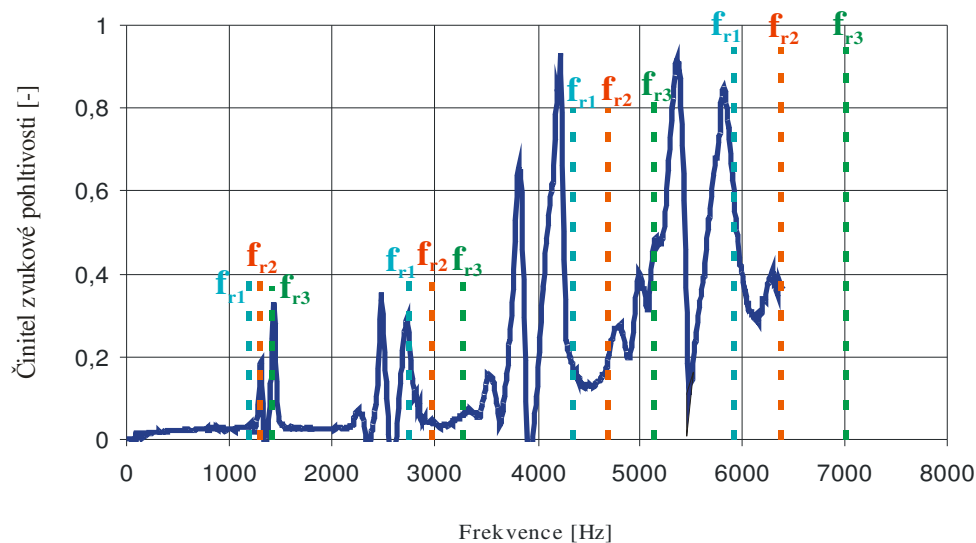
Po úpravě jsou získány vztahy pro výpočet druhých f_2 , třetích f_3 a čtvrtých f_4 rezonančních frekvencí. Hodnoty prvních rezonančních frekvencí f_1 jsou odečteny z grafů. Hodnoty koeficientů a_1 jsou použity z tab.1.

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_2}{a_2} \Rightarrow f_2 = \frac{a_2}{a_1} f_1 = \frac{5,5201}{2,4048} f_1, \quad (24)$$

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_3}{a_3} \Rightarrow f_3 = \frac{a_3}{a_1} f_1 = \frac{8,6537}{2,4048} f_1, \quad (25)$$

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_4}{a_4} \Rightarrow f_4 = \frac{a_4}{a_1} f_1 = \frac{11,7915}{2,4048} f_1. \quad (26)$$

Na obr.29 jsou vyznačena místa, kde by se vyskytovaly rezonance v ideálním rezonančním systému. První rezonanční frekvence jsou brány z naměřených hodnot. Ostatní hodnoty rezonančních frekvencí jsou vypočteny podle vzorců (24), (25), (26).



Obr.29: Princip odečítání rezonančních frekvencí z grafu - vypočtené první, druhé, třetí a čtvrté rezonance trojrezonančního systému pro ideální (teoretický) případ (pro vzorek „BK – A – 5“).

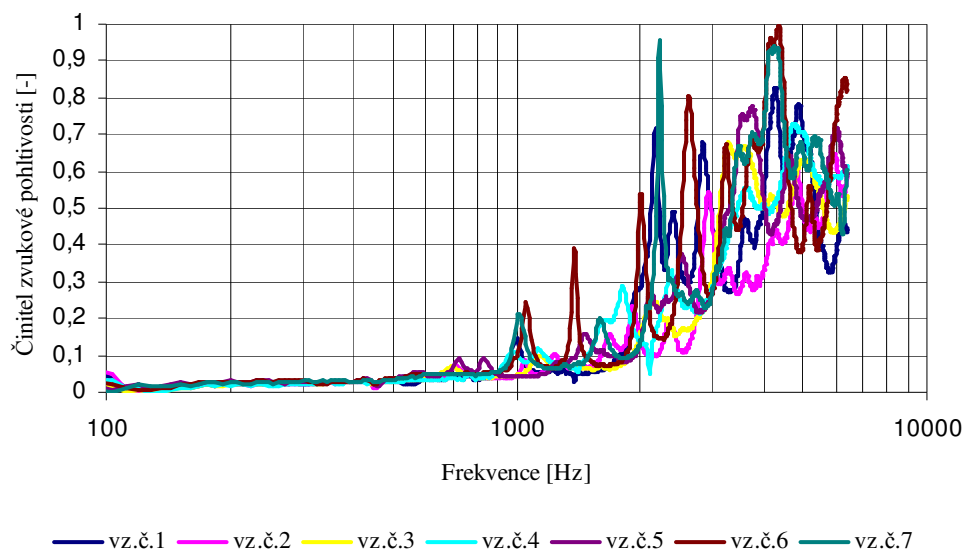
3.9 Statistické vyhodnocení

Činitel zvukové pohltivosti byl proměřen na 7 vzorcích se shodnými parametry, proto aby se mohlo provést statistické vyhodnocení zjištěných hodnot, které reprezentuje chybu měření danou nestejnoměrností samotného nanovláknenného materiálu a také celého absorpčního členu. Přístroj byl před každým měřením kalibrován.

Variabilita měření absorpčního členu je značná. Statistické vyhodnocení je nevypovídající. Obr.30-31 představují příklad grafického zpracování souboru dat pro absorpční vzorky složené z nanovrstvy uchycené mezi dva papírové kroužky. Grafy jsou zde uvedeny pro názornost. Všechny naměřené závislosti se projevují podobně. Velký rozptyl naměřených křivek zřejmě způsobilo uchycení nanovrstvy v kroužku. Nanovláknenné vrstvy nebyly pravděpodobně stejně napnuté.

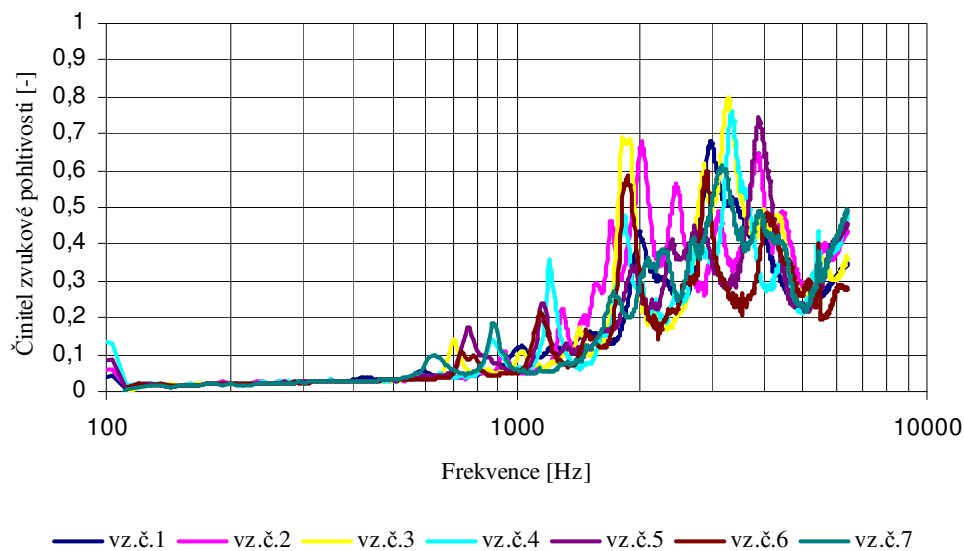
Statistické vyhodnocení nebylo tedy nadále používáno. Do grafů nebyly vynášeny průměrné hodnoty, ale údaje naměřené pro stejný vzorek.

SK-A-10



Obr.30: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$, měřené ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny.

SK-B-20



Obr.31: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$, měřené ve vzdálenosti 20 mm od odrazivé stěny.

4 Výsledky a vyhodnocení

4.1 Vliv velikosti vzduchového polštáře na rezonanční vlastnosti absorpčního členu

Měření bylo provedeno na vzorcích, které byly zhotoveny uložení nanovlákněné vrstvy mezi dva papírové kroužky (obr.19). Membrána, tvořená nanovlákněnou vrstvou, byla postupně vzdalována od odrazivé stěny (obr.21). Byly proměřeny vzorky o různé plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (tab.16).

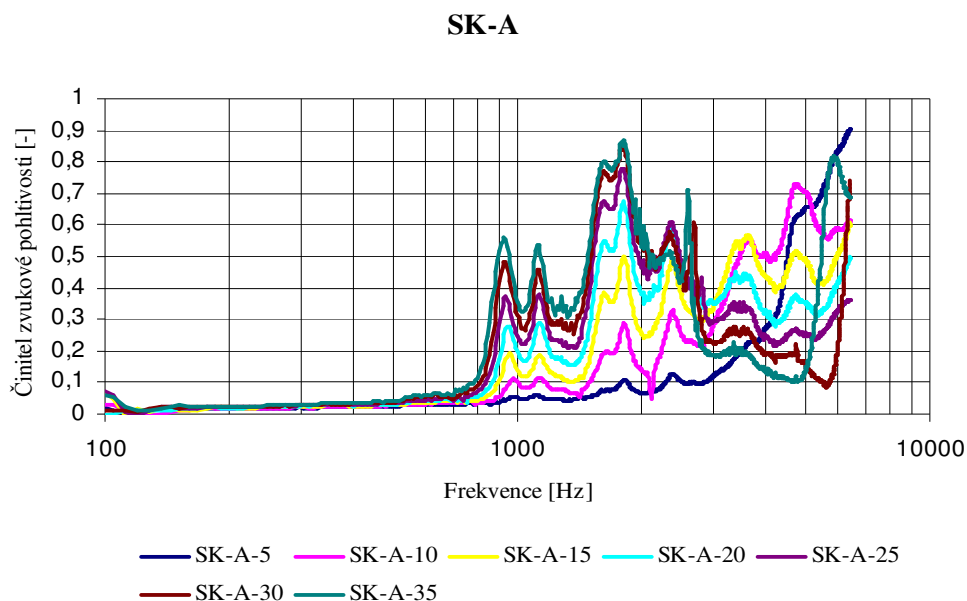
Křivky v následujících grafech představují naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. V jednom grafu jsou vždy soustředěny průběhy naměřené závislosti pro vzorky se stejnou plošnou hmotností v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

Jak lze vidět na obrázcích, křivky začínají růst až kolem frekvence 600 Hz. Nejprve stoupají do určité maximální hodnoty a pak začínají klesat. V následujícím úseku většina křivek naznačuje opět stoupání. V celém průběhu všechny křivky stále kmitají. Průběhy křivek v jednom grafu se téměř kopírují, ale s větší vzdáleností od odrazivé stěny stoupají křivky rychleji a dosahují také vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti. Ve fázi klesání se křivky pro soustavy s větší vzdáleností nanovrstvy od odrazivé stěny dostávají naopak do nižších hodnot činitele zvukové pohltivosti.

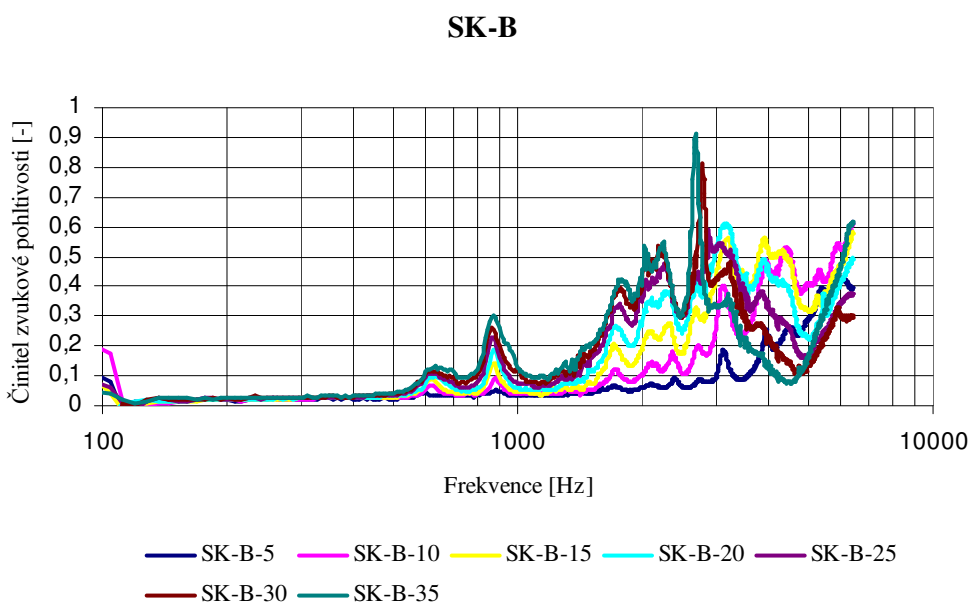
Z grafů (obr.32-35) lze vyčíst, že velikost vzduchového polštáře značně ovlivňuje činitele zvukové pohltivosti celé absorpční soustavy. S rostoucí vzdáleností od odrazivé stěny se křivka činitele zvukové pohltivosti posunuje do vyšších hodnot. V grafech je dále vidět, že vyšší plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy přispívá ke zlepšení zvukové pohltivých vlastností.

Křivky se jednoznačně neprojevují vrcholy, které jsou charakteristické pro rezonance, a proto z těchto grafů nebylo možné odečítat rezonanční frekvence.

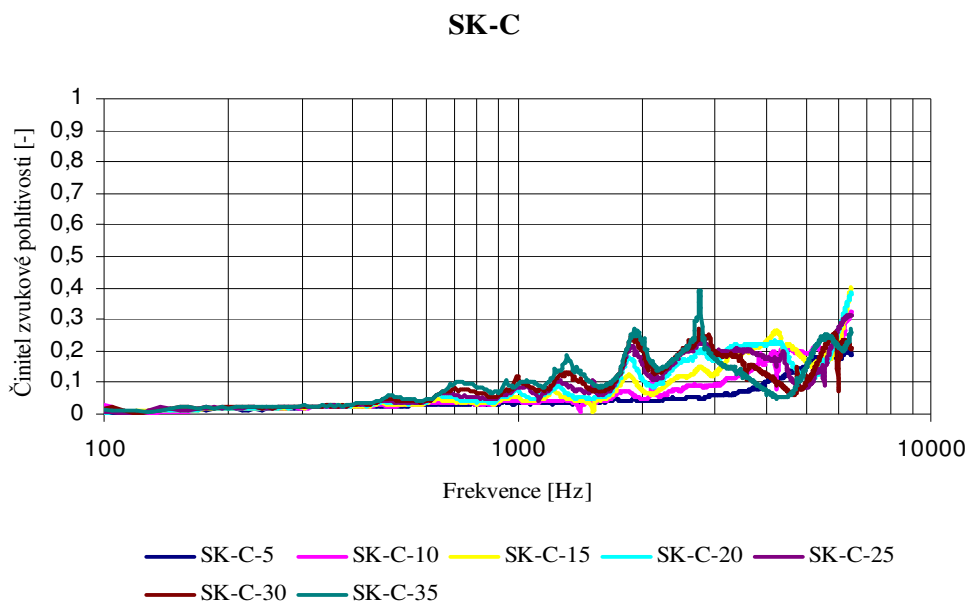
Měření bylo provedeno i pro papírový kroužek bez membrány (viz. Příloha č.3). Je zřejmé, že samotný papírový kroužek ovlivňuje určitým dílem chování celé soustavy, ale zjištěné údaje dosahují pouze minimálních hodnot.



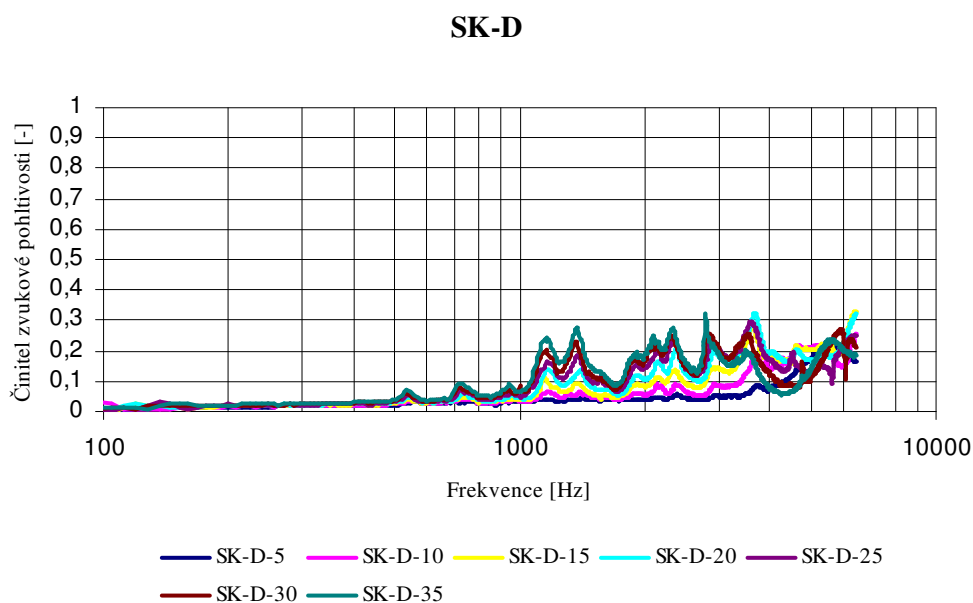
Obr.32: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$, měřené v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.



Obr.33: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$, měřené v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.



Obr.34: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $3,1 \text{ g.m}^{-2}$, měřené v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.



Obr.35: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek nanovrstvy uchycené do nosného kroužku, o plošné hmotnosti $1,4 \text{ g.m}^{-2}$, měřené v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

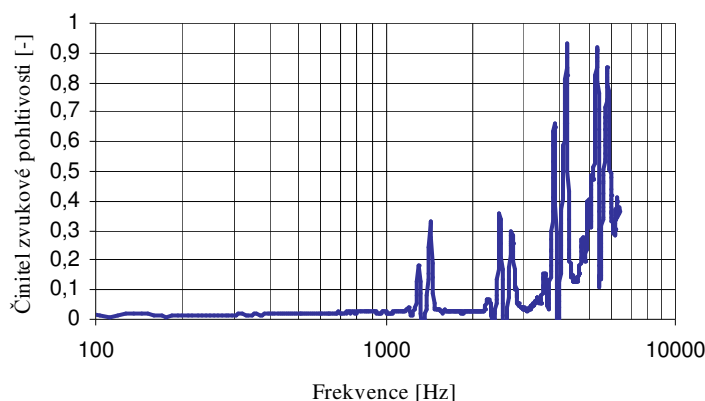
4.2 Vliv velikosti vzduchového polštáře na rezonanční vlastnosti nanovlákněné vrstvy

V tomto měření byla nanovlákněná vrstva umísťována do měřicího zařízení bez „nosného“ papírového kroužku (obr.22). Výsledné grafy jsou zobrazeny na obr.42-45 (viz. Příloha č.2). Součástí naměřených charakteristik jsou vrcholy typické pro rezonance. Do tab.2-15 byly zpracovány rezonanční frekvence odečtené z grafů. V závorkách, za skutečnými hodnotami, jsou vždy uvedeny vypočtené hodnoty příslušející ideálnímu systému.

Hodnoty rezonančních frekvencí byly odečítány pouze pro vzorky o plošné hmotnosti $12,6$ a $5,8 \text{ g.m}^{-2}$. U plošných hmotností $3,1$ a $1,4 \text{ g.m}^{-2}$ se rezonance neprojevuje zřetelně a proto hodnoty příslušejících rezonančních frekvencí nelze dobře odečíst. Průběhy křivek u těchto plošných hmotností se pohybují v nízkých hodnotách činitele zvukové pohltivosti.

Díky interferenci vlnění kmitající membrány a měřicí trubice se mohou některé rezonance zmenšit a být nečitelné. Z tohoto důvodu nejsou v některých tabulkách uvedeny všechny hodnoty rezonančních frekvencí.

BK-A-5



Obr.36: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření nanovlákněné vrstvy (bez nosného kroužku) o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.

Na obr.36 je uveden příklad průběhu naměřené charakteristiky závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. Na křivce je možno vidět několik vrcholů, které se

po třech shlukují do čtyř skupin. Naměřená charakteristika tedy představuje trojrezonanční systém. V každém systému se projevují čtyři rezonance.

Rezonanční systémy se mění s geometrií trubice a s parametry membrány, to znamená se změnou vzdálenosti odrazivé stěny a plošné hmotnosti nanovlákně vrstvy. Porovnáním zobrazených průběhů je zřetelně vidět, že v některých grafech jsou zachyceny 3 rezonanční systémy a v některých pouze 2 rezonanční systémy. Některé křivky vykazují 4 rezonance, další pak 5 rezonancí.

Rezonanční systém se vytváří k určitému prostoru. Mohlo by se tedy předpokládat, že jeden systém náleží membráně a další měřící trubici. Systém membrány se nemění, a proto by měl být stejný i při změnách parametrů trubice. V odečtených hodnotách rezonancí z grafů příslušejících vrstvě o stejné plošné hmotnosti by se měl tedy vyskytovat vždy stejný rezonanční systém. Takový systém v měření však nalézt nelze, hodnoty žádného systému nejsou podobné. Jedná se o reálný systém a z teorie se dá pouze usuzovat pravděpodobné chování. Další dva rezonanční systémy přísluší měřicímu přístroji. Jeden by mohl připadat té části trubice, která má menší průměr a druhý systém druhé části trubice o větším průměru. Pokud jsou v grafu zřetelné pouze dva rezonanční systémy, je možné, že dva rezonanční systémy se překrývají.

Nebylo provedeno dostatek měření, proto ze zjištěných údajů nelze učinit jednoznačné závěry. Měření mělo spíše naznačit jaký postup zvolit při zjišťování hodnot rezonancí a mělo by tak být spíše návodem pro další měření.

Tab.2: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.

BK - A – 5				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	1208	2264 (2773)	3568 (4347)	5016 (5923)
f_{r2}	1304	2480 (2993)	3832 (4692)	5384 (6394)
f_{r3}	1432	2728 (3287)	4224 (5153)	5832 (7022)

Tab.3: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny.

BK - A - 10				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	1272	2256 (2920)	3696 (4577)	5240 (6237)
f_{r2}	1344	2528 (3085)	3928 (4836)	5480 (6590)
f_{r3}	1472	2752 (3379)	4160 (5297)	5792 (7218)

Tab.4: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 15 mm od odrazivé stěny.

BK - A - 15				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	1424	2664 (3269)	4072 (5124)	5648 (6982)
f_{r2}	1560	2824 (3581)	4376 (5614)	6040 (7649)

Tab.5: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 20 mm od odrazivé stěny.

BK - A - 20				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	1432	2792 (3287)	4112 (5153)	5232 (7022)
f_{r2}	1584	3144 (3636)	4424 (5700)	6056 (7767)

Tab.6: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 25 mm od odrazivé stěny.

BK - A - 25				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	1040	2056 (2387)	3512 (3742)	5128 (5099)
f_{r2}	1608	2728 (3691)	4096 (5786)	5672 (7884)
f_{r3}	1656	3072 (3801)	4464 (5959)	6064 (8120)

Tab.7: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

BK - A - 30					
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5. rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	984	1632 (2259)	2656 (3541)	4120 (4825)	4968
f_{r2}	1632	3072 (3746)	4968 (5873)	6344 (8002)	?

Tab.8: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny.

BK - A – 35					
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	936	2040 (2149)	? (3368)	? (4590)	?
f_{r2}	1160	2568 (2663)	? (4174)	? (5688)	6016
f_{r3}	1640	3072 (3765)	? (5902)	? (8041)	?

Tab.9: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 5				
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]
f_{r1}	Nelze odečíst			
f_{r2}				
f_{r3}				

Tab.10: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 10					
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	1056	2048 (2424)	3160 (3800)	4216 (5178)	5296
f_{r2}	1240	2136 (2846)	3528 (4462)	4432 (6080)	6120
f_{r3}	1328	2320 (3048)	3760 (4779)	4800 (6512)	?

Tab.11: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 15 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 15					
Resonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	1080	2200 (2479)	3112 (3886)	4352 (5296)	5648
f_{r2}	1208	2232 (2773)	3480 (4347)	4664 (5923)	5992
f_{r3}	1312	2472 (3012)	3704 (4721)	5040 (6433)	?

Tab.12: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 20 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 20					
Rezonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	1080	2160 (2479)	3120(3886)	4352 (5296)	5408
f_{r2}	1184	2256 (2718)	3408 (4261)	4680 (5806)	?
f_{r3}	1312	2488 (3012)	3704 (4721)	5016 (6433)	?

Tab.13: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 25 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 25					
Rezonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	1024	? (2351)	2976 (3685)	? (5021)	5200
f_{r2}	1208	2312 (2773)	3520 (4347)	? (5923)	?
f_{r3}	1344	2568 (3085)	3792 (4836)	? (6590)	?

Tab.14: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 30					
Rezonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	976	2072 (2240)	? (3512)	? (4786)	?
f_{r2}	1240	2584 (2846)	3584 (4462)	4992 (6080)	6216
f_{r3}	1408	2880 (3232)	3872 (5067)	5776 (6904)	?

Tab.15: Rezonanční charakteristiky nanovrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny.

BK - B – 35					
Rezonanční systém	1. rezonance (f_1) [Hz]	2. rezonance (f_2) [Hz]	3. rezonance (f_3) [Hz]	4. rezonance (f_4) [Hz]	5 rezonance (f_5) [Hz]
f_{r1}	928	2008 (2130)	3328 (3339)	? (4550)	?
f_{r2}	1248	2576 (2865)	3544 (4491)	? (6119)	6256
f_{r3}	1408	2816 (3232)	3936 (5067)	? (6904)	?

4.3 Vliv vrstvení absorpčních členů na zvukově pohltivé vlastnosti celkové soustavy

Současným měřením několika vyrobených absorpčních vzorků (obr.20) najednou byly získány následující průběhy činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci (obr.37, 47-49) .

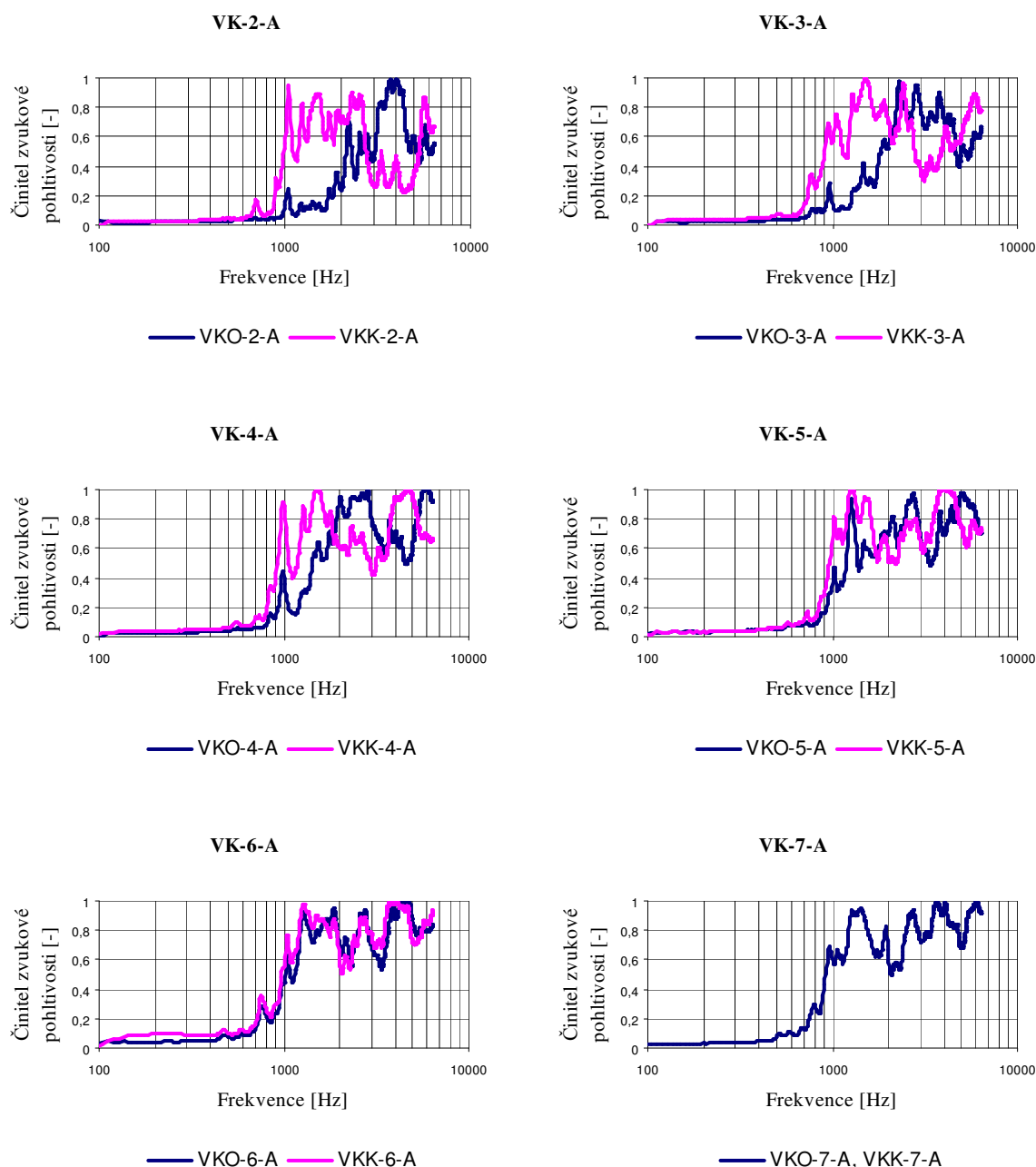
Absorpční systém, tvořený určitým počtem vzorků, byl proměřen nejprve takovým způsobem, že vzorky byly umístěny v měřicí trubici přímo za odrazivou stěnou (viz. odst. 6.2). Následovalo podobné měření, kdy do měřicí trubice byl dán stejný počet vzorků, ale mezi odrazivou stěnu a soubor vzorků byl vložen vzduchový polštář o definované velikosti (viz. odst. 6.3).

V jednotlivých grafech je vždy porovnáno měření se stejným počtem vzorků, avšak jedna křivka přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhá křivka znázorňuje měření, kdy byla vložena za odrazivou stěnu vzduchová mezerka.

Je zřejmé, že čím více absorpčních členů přibývá do měřicí trubice a vzorky tak postupně zaplňují v trubici prostor do 35 mm od odrazivé stěny, tím více se průběhy křivek obou případů vrstvení přibližují. Dochází ke zmenšování rozdílu mezi oběma případy absorpčních soustav.

Křivky začínají stoupat kolem frekvence 600 Hz do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti nezávisle na počtu vzorků v trubici a velikosti příslušejícího vzduchového polštáře. Následně, po dosažení maximální hodnoty v závislosti na plošné hmotnosti nanovrstvy, kolísají křivky v určitém rozsahu hodnot činitele zvukové pohltivosti. Měřicí trubice je postupně naplňována dalšími absorpčními vzorky a na grafech lze pozorovat, že rozsah kolísání se zmenšuje a pohybuje se spíše ve vyšších hodnotách činitele zvukové pohltivosti. Kolísání křivky se může zřejmě přičítat faktu, že na sebe působí jednotlivé absorpční prvky celé soustavy, která je tvořena střídavě nanovrstvou a vzduchovou mezerou.

V grafech je dále názorně vidět, že v absorpčních soustavách se vzduchovým polštářem mezi odrazivou stěnou a souborem absorpčních vzorků se dostávají křivky do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti rychleji než-li v soustavách, kde byly vrstveny vzorky přímo od odrazivé stěny. S přibývajícími členy však rostou křivky v těchto soustavách rychleji a přibližují se tak křivkám z předchozího způsobu vrstvení vzorků.

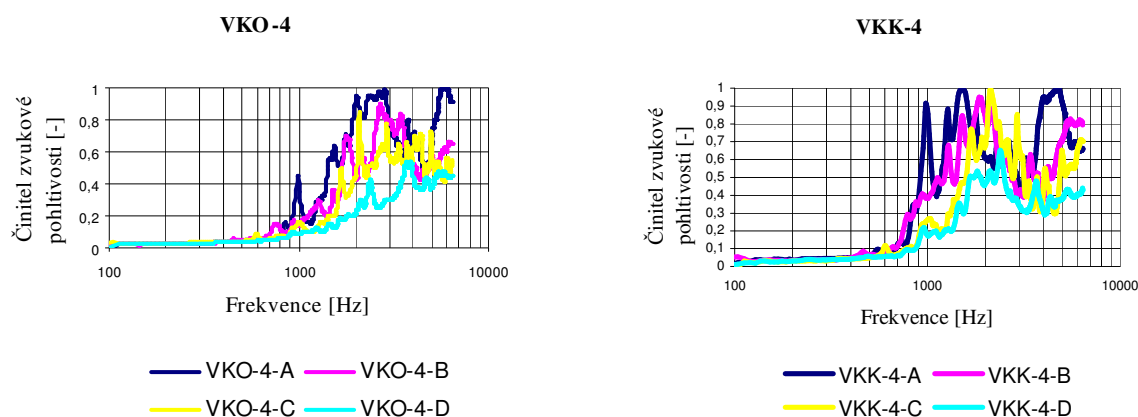


Obr.37: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy s různým počtem vzorků. Membrána byla tvořena nanovrstvou o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$. Jedna křivka v grafu přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhá křivka znázorňuje měření, kdy byl vložen za odrazivou stěnu vzduchový polštář.

Předchozí obrázky popisují závislost činitele zvukové pohltivosti na měnící se frekvenci pro plošnou hmotnost $12,6 \text{ g.m}^{-2}$. Průběhy ostatních plošných hmotností jsou

obdobné. Křivky se chovají velmi podobně, jsou však posunuty do nižších hodnot činitele zvukové pohltivosti (viz. Příloha č.6).

Obr.38 zobrazuje závislost měřené veličiny na plošné hmotnosti nanovrstvy. Příklad je uveden pro absorpční soustavu obsahující 4 vzorky při vrstvení od odrazivé stěny a při vrstvení směrem k odrazivé stěně se stejným počtem vzorků. S rostoucí plošnou hmotností křivky rostou rychleji a dosahují vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti.



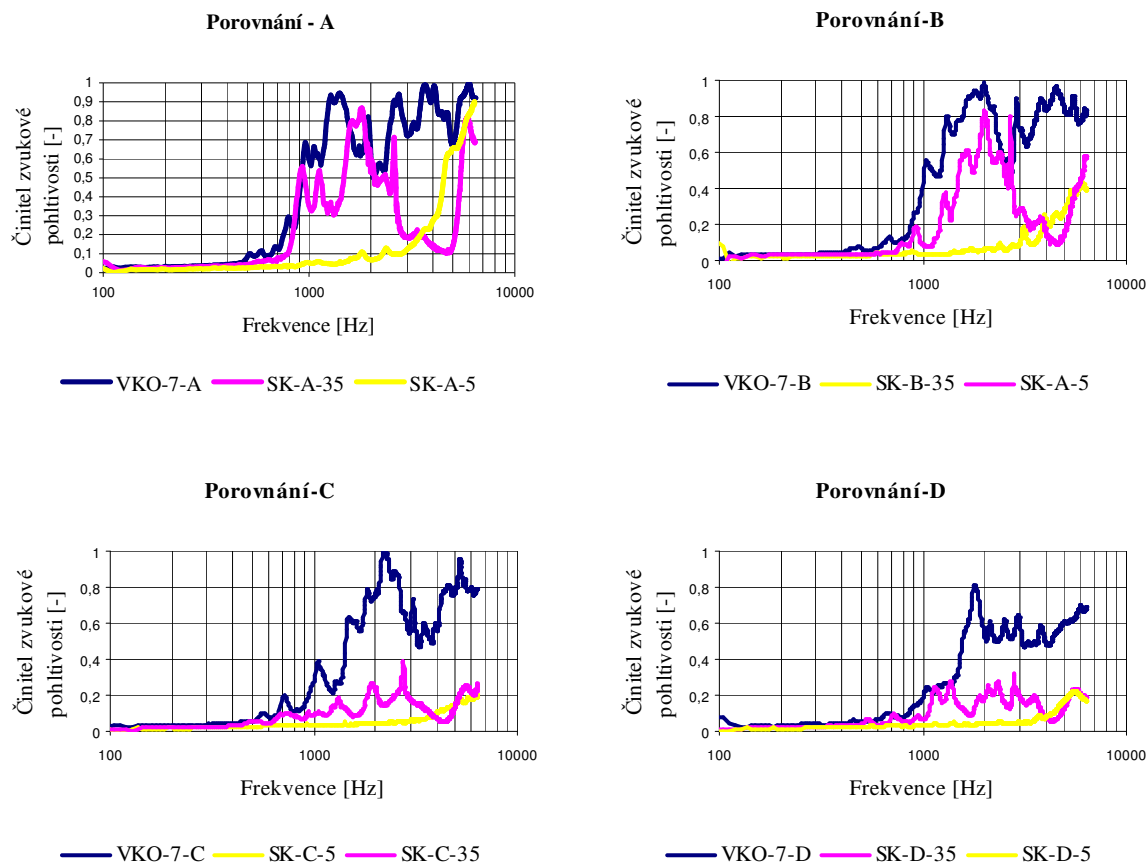
Obr.38: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy se čtyřmi vzorky. První graf přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhý graf znázorňuje měření, kdy byl vložen za odrazivou stěnu vzduchový polštář. Jednotlivé křivky v grafu reprezentují různou plošnou hmotnost.

Na obr.39 jsou znázorněny grafy porovnávající tři různé absorpční soustavy. Jednotlivé grafy prezentují zjištěné závislosti pro různé plošné hmotnosti nanovlákných vrstev. Modré křivky představují naměřenou závislost pro soustavu tvořenou sedmi absorpčními vzorky. Růžové křivky zobrazují závislost pro soustavu tvořenou jedním absorpčním vzorkem ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny. Žluté křivky reprezentují soustavu tvořenou jedním absorpčním vzorkem ve vzdálenosti 5 mm od odrazivé stěny.

Na grafu je vidět, jaký efekt vyvolá změna velikosti vzduchového polštáře z 5 mm na 35 mm a jaký účinek nastane nahradí-li se vzduchový polštář o velikosti 35 mm dalšími absorpčními vzorky a vytvoří se tak systém, ve kterém se střídají vzduchové mezery o 5 mm s nanovrstvami.

Vzduchová mezera mezi nanovrstvou a odrazivou stěnou hraje významnou roli v pohlcování zvuku. V jednoprvkových systémech lišících se velikostí vzduchové mezery

stoupají křivky rychleji, a také do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti s větší vzduchovou mezerou.



Obr.39: Vliv změny velikosti vzduchového polštáře a počtu absorpčních členů na zvukové pohltivé vlastnosti absorpční soustavy. Porovnání průběhů činitele zvukové pohltivosti pro absorpční soustavy tvořené absorpčním vzorkem ve vzdálenosti 5 mm a 35 mm od odrazivé stěny a sedmi absorpčními vzorky. Jednotlivé grafy představují naměřené závislosti pro nanovlákněné vrstvy o plošných hmotnostech 12,6; 5,8; 3,1 a 1,4 g.m⁻².

Porovnáním sedmiprvkového absorpčního systému a jednoprvkového systému se vzduchovým polštářem o velikosti 35 mm pro plošné hmotnosti nanovrstev 12,6 a 5,8 g.m⁻² je zřejmé, že křivky v sedmiprvkovém systému stoupají rychleji do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti než-li křivky pro jednoprvkový systém, přičemž maximální dosažené hodnoty jsou téměř srovnatelné. Činitel zvukové pohltivosti kolísá v rozmezí 0,6 - 1 u sedmiprvkového systému od frekvence přibližně 900 Hz pro plošnou hmotnost 12,6 g.m⁻², a v rozmezí 0,5 - 1 od frekvence přibližně 1200 Hz pro plošnou hmotnost 5,8 g.m⁻². U jednoprvkového systému však dojde po dosažení maximální hodnoty k výraznému poklesu téměř k nulové hodnotě za neustálého kolísání.

Křivky pro sedmiprvkový absorpční systém s nanovrstvami o plošných hmotnostech 3,1 a 1,4 g.m⁻² vystoupají do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti oproti křivkám pro jednoprvkový systém ve vzdálenosti 35 mm. Tento rozdíl je velmi výrazný. Činitel zvukové absorpce kolísá v rozmezí 0,45 - 1 u sedmiprvkového systému od frekvence přibližně 1500 Hz pro plošnou hmotnost 3,1 g.m⁻², a v rozmezí 0,45 – 0,8 od frekvence přibližně 1500 Hz pro plošnou hmotnost 1,4 g.m⁻². U jednoprvkového systému nepřesáhne činitel zvukové pohltivosti hodnotu 0,4.

5 Závěr

Tato práce studovala chování nanovrstvy podrobené působení zvukových vln. Měření bylo provedeno pro dva odlišné způsoby uchycení nanovrstvy, pro různé vzdálenosti nanovrstvy od odrazivé stěny a pro rozdílný počet vzorků v měřicí trubici. V jednotlivých absorpčních soustavách byly proměřovány nanovrstvy o plošných hmotnostech 12,6; 5,8; 3,1 a 1,4 g.m⁻².

Nejprve byl do měřícího zařízení vkládán absorpční vzorek vyrobený umístěním nanovrstvy mezi dva papírové kroužky (obr.18). Ze získaných grafů (obr.32-35) je patrné, že s rostoucí velikostí vzduchového polštáře se křivka činitele zvukové pohltivosti posunuje do vyšších hodnot. Vyšší plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy přispívá ke zlepšení zvukově pohltivých vlastností. Ze zjištěných průběhů nelze však odečítat rezonanční frekvence příslušející membráně.

Nanovlákněná vrstva byla také uchycena mezi díly měřicí trubice (obr.22). Průběhy činitele zvukové pohltivosti (obr.42-45) se ve srovnání s předchozím případem uchycení nanovrstvy podstatně liší. Naměřené průběhy se projevují výraznými vrcholy a poklesy téměř k nulovým hodnotám činitele zvukové pohltivosti. K efektivnímu pohlcení zvuku dochází pouze v určitých intervalech zvukových frekvencí. Křivky, naměřené pro absorpční vzorky, stoupají od frekvence přibližně 600 Hz do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti. Potom, co dosáhnou určité maximální hodnoty, v závislosti na velikosti vzduchového polštáře a plošné hmotnosti nanovrstvy, klesají tyto křivky k nižším hodnotám. Některé křivky naznačují od určité frekvence opět stoupání. Současně se křivky v celém naměřeném průběhu projevují mírnějším kolísáním.

Z grafů pro nanovlákněnou vrstvu uchycenou mezi díly měřicí trubice byly odečteny hodnoty rezonančních frekvencí (tab.2-15), které je však nutné brát pouze jako orientační údaje. Pro jednoznačné vyhodnocení je nezbytné provést více měření.

Dále byla v experimentu zkoumána absorpční soustava tvořená současně několika vyrobenými absorpčními vzorky (obr.18). V soustavách, kde je vytvořena vzduchová mezera mezi odrazivou stěnou a souborem absorpčních vzorků, stoupají křivky prudce do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti. V případě vrstvení vzorků přímo od odrazivé stěny dochází k růstu křivky pozvolna v porovnání s předchozím případem, ale s přibývajícími absorpčními členy stoupají křivky rychleji do vyšších hodnot (obr.37, 47-49). Po dosažení určité maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na plošné hmotnosti nanovrstvy, kolísají křivky v určitém rozmezí měřené veličiny. Rozpětí

kolísání souvisí s počtem absorpčních vzorků v měřicí trubici. Postupným zaplňováním měřicí trubice dalšími absorpčními vzorky se rozsah kolísání křivek zmenšuje a pohybuje se spíše ve vyšších hodnotách činitele zvukové pohltivosti.

Vzduchová mezera mezi nanovrstvou a odrazivou stěnou hraje významnou roli v pohlcování zvuku. Nahradí-li se vzduchová mezera dalšími absorpčními vzorky, je výsledný účinek efektivnější (obr.39). K lepší pohltivosti přispívá i plošná hmotnost nanovrstvy.

Pro další výzkum rezonančních charakteristik nanovláknenných vrstev by bylo vhodné zabývat se zjišťováním činitele zvukové pohltivosti nanovrstvy uchycené mezi díly měřicí trubice. Aby bylo možné učinit jednoznačné vyhodnocení, je nutné provést měření opakovaně.

Pro výpočet vlastních frekvencí membrány musel být v této práci použit upravený vzorec (16), protože nebylo možné stanovit radiálně působící napínací sílu. Vývoj by proto mohl postupovat tímto směrem, tak aby mohla být tato veličina určena.

6 Seznam použité literatury

- [1] KALINOVÁ, K.: Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury. *Disertační a habilitační práce. TU v Liberci, 2005*, ISBN 80-7083-997-X.
- [2] KOLMER, F., KYNCL, J.: Prostorová akustika. 1. vydání, Praha, 1980. ISBN 04-514-80.
- [3] AISBERG, E.: Fyzika všude kolem nás. SPN, Praha, 1975.
- [4] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠENDELÁŘ, V.: Technická fyzika. 2.vydání, SNTL Praha, 1960.
- [5] SVOBODA, E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, Praha 1996. ISBN 80-7196-116-7.
- [6] *Absorpce zvuku*. [online] [cit. 4. 2. 2007] Dostupné na World Wide Web: <http://www.ecophon.cz/default____5361.aspx>
- [7] *Akustické parametry*. [online] [cit. 4. 2. 2007] Dostupné na World Wide Web: <<http://europe.usg.com/usgcz/techacoustic.htm>>
- [8] Školící a pilotní pracoviště TU v Liberci [fotografie měřící impedanční trubice], [online] [cit. 4. 2. 2007] Dostupné na World Wide Web: <http://www.ksd.vslib.cz/skolici_pracoviste/>
- [9] BRÜEL & KJAER, Denmark: Sound & Vibration Measurement. Naerum 2000 – 2002.
- [10] LEE, Y., JOO, CH.: Sound Absorption Properties of Recycled Polyester Fibrous Assembly Absorbers. *AUTEX Research Journal, June 2003, vol. 3, no. 2*.
- [11] JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., LUKAŠ, D., KOTEK, V., MARTINOVÁ, L., CHALOUPEK, J.: A Method of Nanofibres Production from a Polymer Solution Using Electrostatic Spinning and a Device for Carrying Out the Method. European Patent Office, US2006290031. 2006-12-28.
- [12] JIRSÁK, O., KALINOVÁ, K.: Netkané textilie. *Skripta TU v Liberci, Liberec 2003*. ISBN 80-7083-746-2.
- [13] FRENOT, A.,CHRONAKIS, I. S.: Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current Opinion in Colloid & Interface Science, March 2003, vol. 8, no. 1, p. 64-75*.
- [14] HUANG, Z., ZHANG, Y. Z.,KOTAKI, M., RAMAKRISHNA, S.: A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites.

- Composites Science and Technology*, November 2003, vol. 63, no. 15, p. 2223-2253.
- [15] Measurements in Building Acoustics. BRÜEL & KJAER, Naerum, 1988. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.bksv.com/pdf/Measurements_in_Building_Acoustics.pdf>
- [16] GRAFE, T., GRAHAM, K.: Polymeric Nanofibers and Nanofiber Webs: A New Class of Nonwovens, INTC 2002. *International Nonwovens Technical Conference, Atlanta, Georgia, September 2002*.
- [17] KREBSOVÁ, M.: Nauka o polymerech. *Skriptum VŠST, Liberec 1978*.
- [18] ZWIKKER, C., KOSTEN, C. W.: Sound absorbing materials. *Elsevier Pub. Co., Oxford 1949*.
- [19] DELANY, M. E., BAZLEY, E. N.: Acoustical properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*, April 1970, vol. 3, no. 2, p. 105-116.
- [20] ATTENBOROUGH, K.: The influence of microstructure on propagation in porous fibrous absorbents. *Journal of Sound and Vibration*, June 1971, vol. 16, no. 3, p. 419-442.
- [21] SIDES, D. J., ATTENBOROUGH, K., MULHOLLAND, K. A.: Application of a generalized acoustic propagation theory to fibrous absorbents. *Journal of Sound and Vibration*, November 1971, vol. 19, no. 1, p. 49-64.
- [22] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y.: Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs. *Applied Acoustics*, January 2000, vol. 59, no. 1, p. 77-87.
- [23] ALLARD, J., F. and CHAMPOUX, Y.: New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, vol. 91, no. 6, p. 3346-3353.
- [24] VORONINA, N.: Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Applied Acoustics*, June 1996, vol. 48, no. 2, p. 121-132.
- [25] ACKERMANN, U., FUCHS, H. V., RAMBAUSEK, N.: Sound absorbers of a novel membrane construction. *Applied Acoustics*, 1988, vol. 25, no. 3, p. 197-215.
- [26] FROMMHOLD, W., FUCHS, H. V., SHENG, S.: Acoustic Performance of Membrane Absorbers. *Journal of Sound and Vibration*, March 1994, vol. 170, no. 5, p. 621-636.
- [27] VORONINA, N.: Acoustic properties of synthetic films. *Applied Acoustics*, October 1996, vol. 49, no. 2, p. 127-140.

-
- [28] KANG, J., FUCHS, H. V.: Predicting the absorption of open weave textiles and microperforated membranes backed by an air space. *Journal of Sound and Vibration*, March 1999, vol. 220, no. 5, p. 905-920.
- [29] SAKAGAMI, K., KIYAMA, M., MORIMOTO, M. Y., TAKAHASHI, D.: Sound absorption of a cavity-backed membrane: A step towards design method for membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*, November 1996, vol. 49, no. 3, p. 237-247.
- [30] HANNA, Y. I., KANDIL, M. M.: Sound absorbing double curtains from local textile materials. *Applied Acoustics*, 1991, vol. 34, no. 4, p. 281-291.
- [31] NARANG, P. P.: Materiál parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. *Applied Acoustics*, 1995, vol. 45, no. 4, p. 335-358.
- [32] GARAI, M., POMPOLI, F.: A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*, December 2005, vol. 66, no. 12, p. 1383-1398.
- [33] WILSON, D., K.: Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media. *Applied Acoustics*, March 1997, vol. 50, no. 3, p. 171-188.
- [34] BOSMANS, I., LAURIKS, W., LOMBAERT, G., MERMANS, J., VERMEIR, G.: Sound absorption of stretched ceilings with an impervious synthetic membrane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, July 1999, vol. 106, no. 1, p. 233-239.
- [35] LEE, J., SWENSON, G. W.: Compact sound absorbers for low frequencies. *Noise Control Engineering Journal*, 1992, vol. 3, no. 3, p. 109-117.
- [36] WOOD, K. R., MARTINSON, P. A.: Shaped microperforated polymeric film sound absorbers and methods of manufacturing the same. *European Patent Office*, WO 0203375. 2002-01-10.
- [37] SAKAGAMI, K., KIYAMA, M., MORIMOTO, M., UYAMA, T.: Prediction of the reverberation absorption coefficient of finite-size membrane absorbers. *Applied Acoustics*, June 2005, vol. 66, no. 6, p. 653-668.
- [38] CONGYUN, Z., QIBAI, H.: A method for calculating the absorption coefficient of a multi-layer absorbent using the electro-acoustic analogy. *Applied Acoustics*, July 2005, vol. 66, no. 7, p. 879-887.
- [39] LEE, Y. Y., LEE, E. W. M.: Widening the sound absorption bandwidths of flexible micro-perforated curved absorbers using structural and acoustic resonances.

International Journal of Mechanical Sciences, January 2007. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/>>

- [40] ŠKVOR, Z.: Akustika a elektroakustika. První vydání. Akademie věd České republiky, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [41] PARK, J. B., GROSH, K., KIM, Y. H.: The effect of a periodic absorptive strip arrangement on an interior sound field in a room. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, vol. 117, no. 2, p. 763-770.

7 Seznam příloh

Příloha č.1: Obr.40 - 41 – Snímky struktury vzorku nanovlákných vrstev plošných hmotností 12,6; 5,8; 3,1 a 1,4 g.m⁻², nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

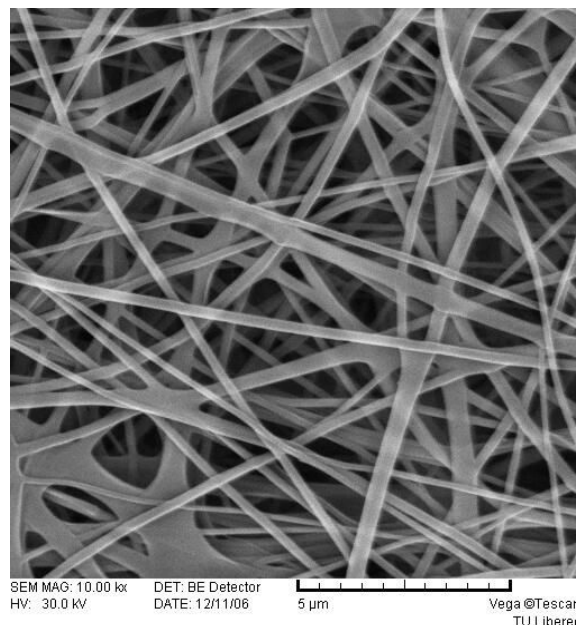
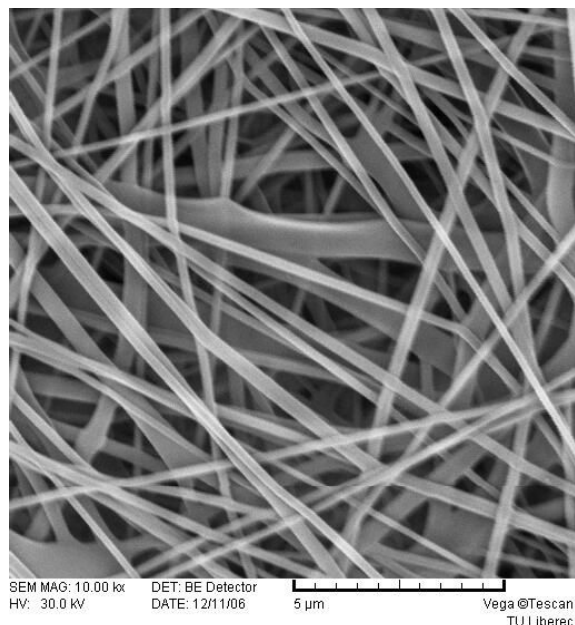
Příloha č.2: Obr.42 - 45 - Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro vzorky nanovlákných vrstev o plošných hmotnostech 12,6; 5,8; 3,1; 1,4 g.m⁻² vkládaných do měřicí aparatury bez nosného kroužku. Vzorky byly proměřovány v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

Příloha č.3: Obr.46 – Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro papírový kroužek bez membrány. Závislost byla zjišťována v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

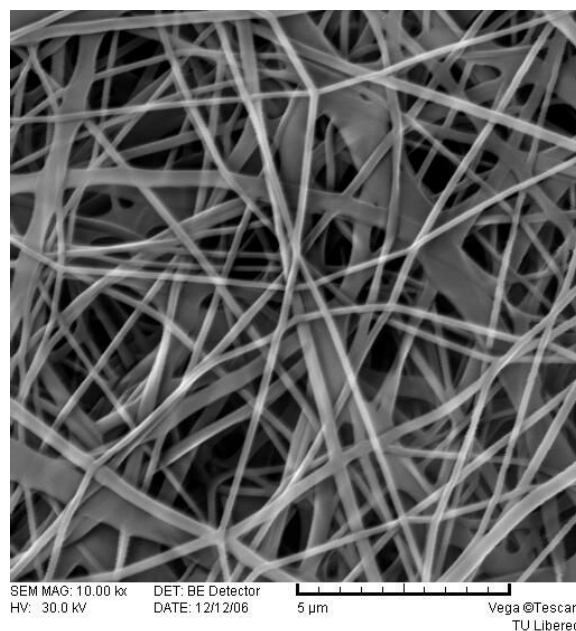
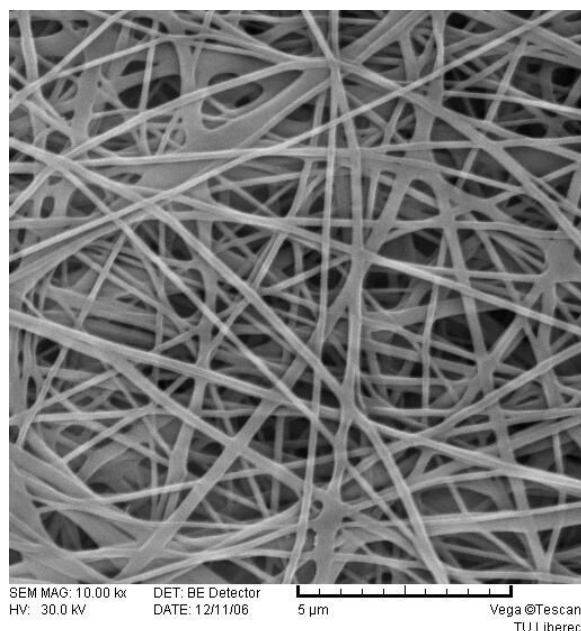
Příloha č.4: Tab.16 – Plošné hmotnosti nanovlákných vrstev.

Příloha č.5: Složení zvlákněvaného roztoku polyvinylalkoholu.

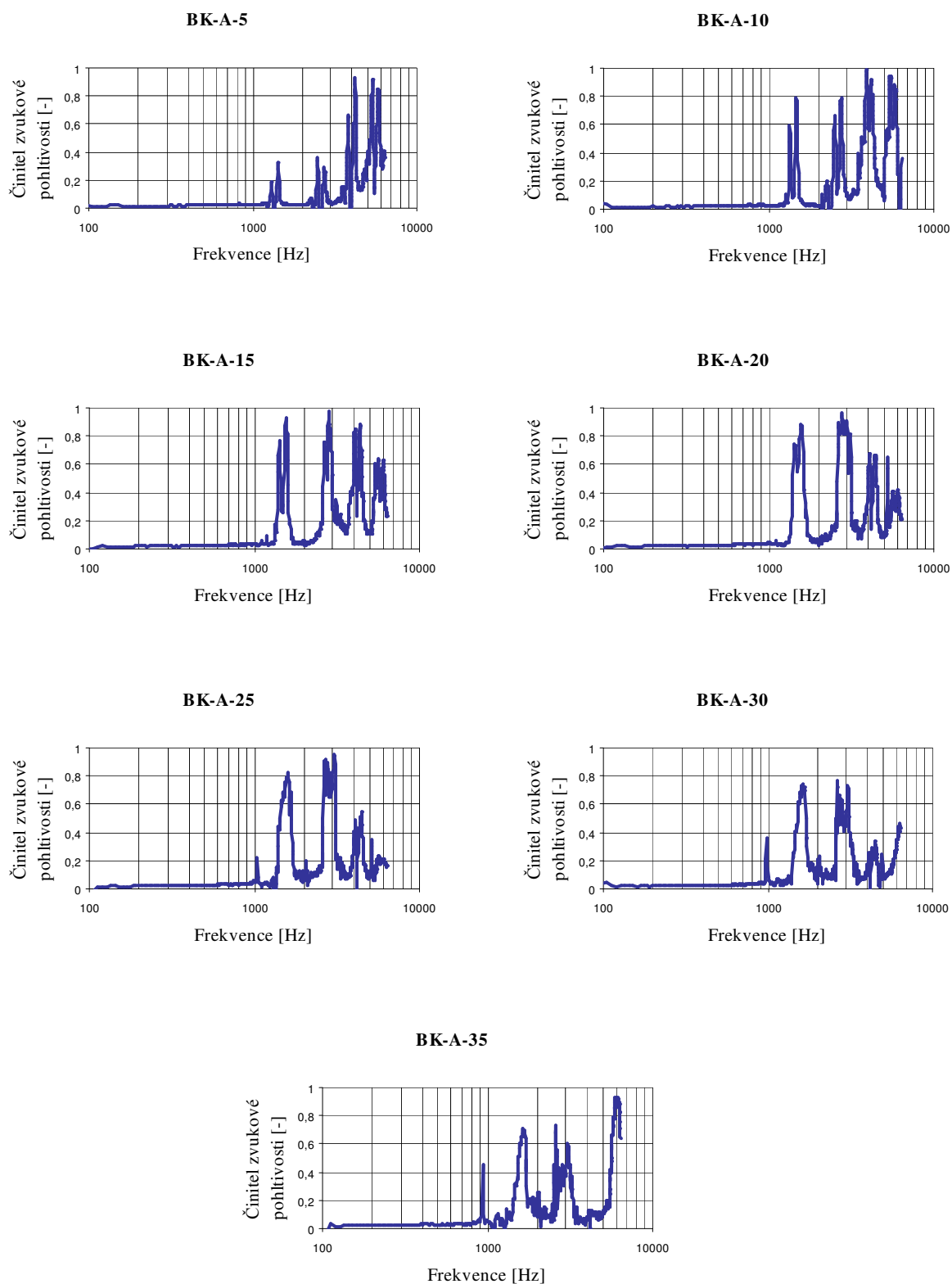
Příloha č.6: Obr.47 - 49 – Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy s různým počtem vzorků (1-7 vzorků). Membrány byly tvořeny nanovrstvami o plošných hmotnostech 12,6; 5,8; 3,1 a 1,4 g.m⁻². Bylo provedeno měření při kladení vzorků přímo od odrazivé stěny a měření, kdy byl za odrazivou stěnu vložen vzduchový polštář.

Příloha č.1

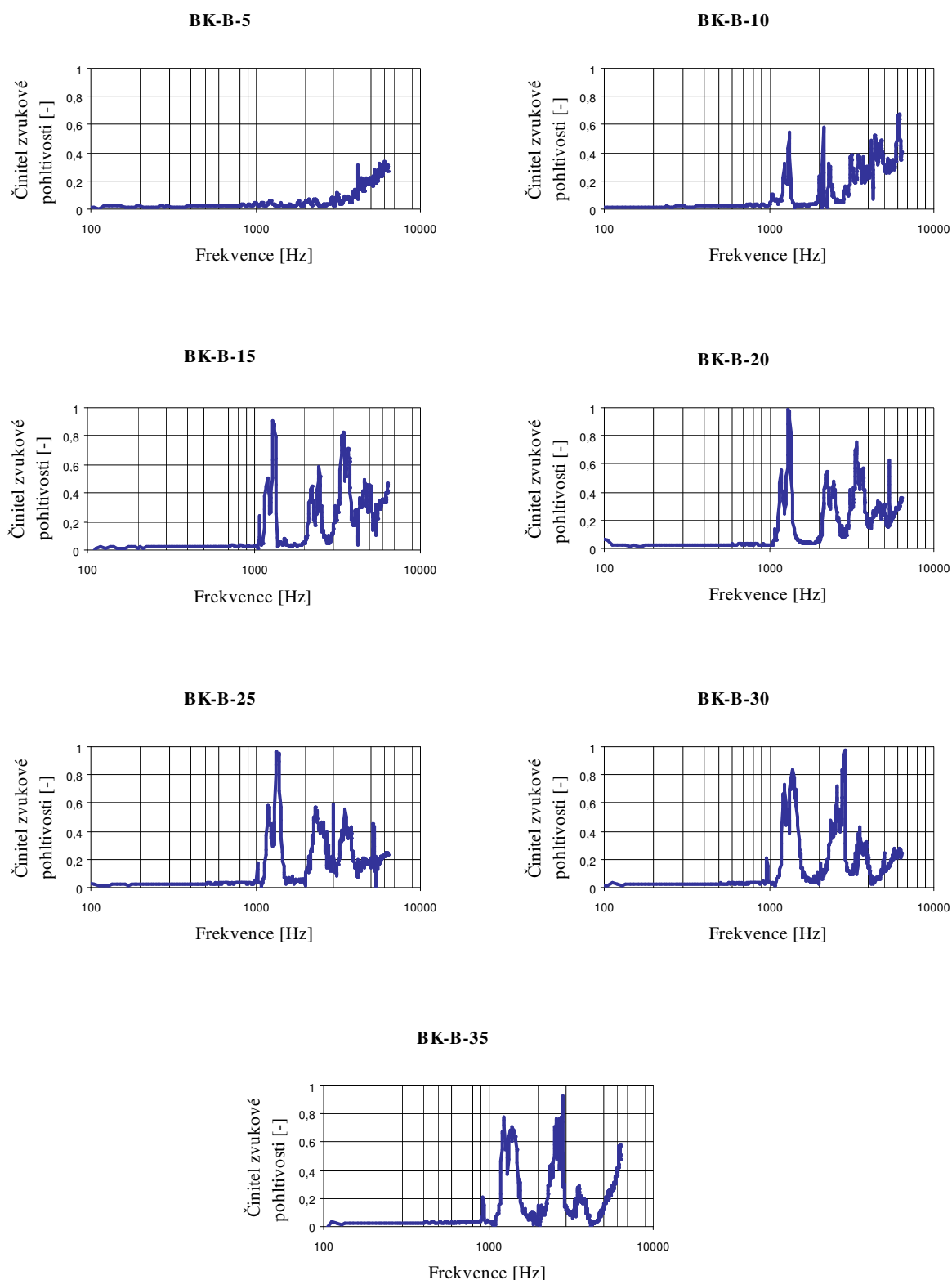
Obr.40: Snímky struktury vzorku nanovláknenné vrstvy nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. První snímek přísluší plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$, druhý pak plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$.



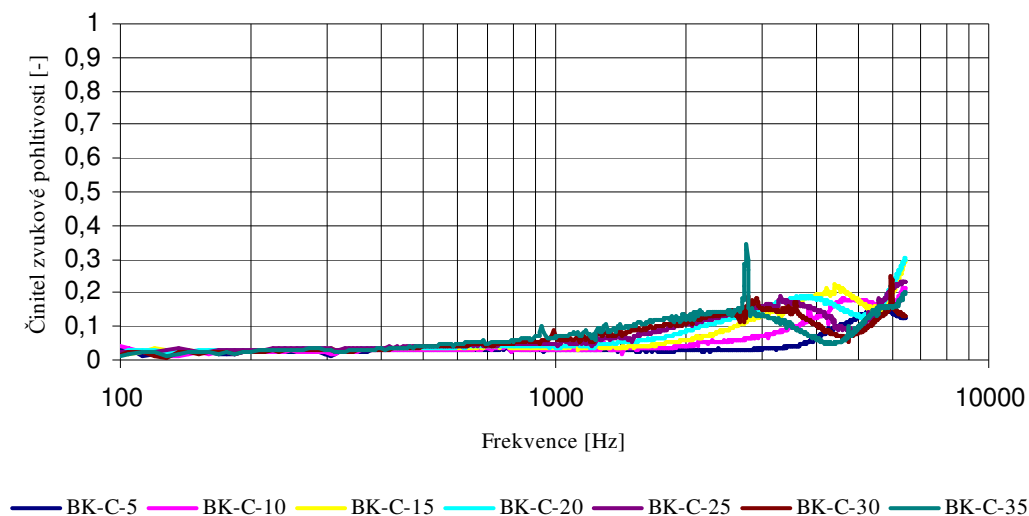
Obr.41: Snímky struktury vzorku nanovláknenné vrstvy nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. První snímek přísluší plošné hmotnosti $3,1 \text{ g.m}^{-2}$, druhý pak plošné hmotnosti $1,4 \text{ g.m}^{-2}$.

Příloha č.2

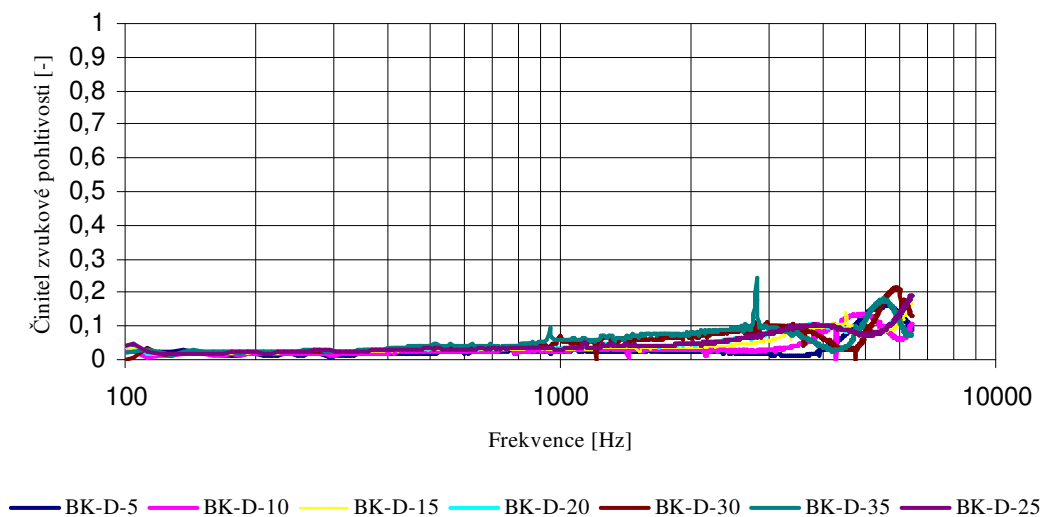
Obr.42: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro vzorek nanovlákněné vrstvy o plošné hmotnosti $12,6 \text{ g.m}^{-2}$ vkládané do měřící aparatury bez nosného kroužku. Vzorek byl proměřován v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.



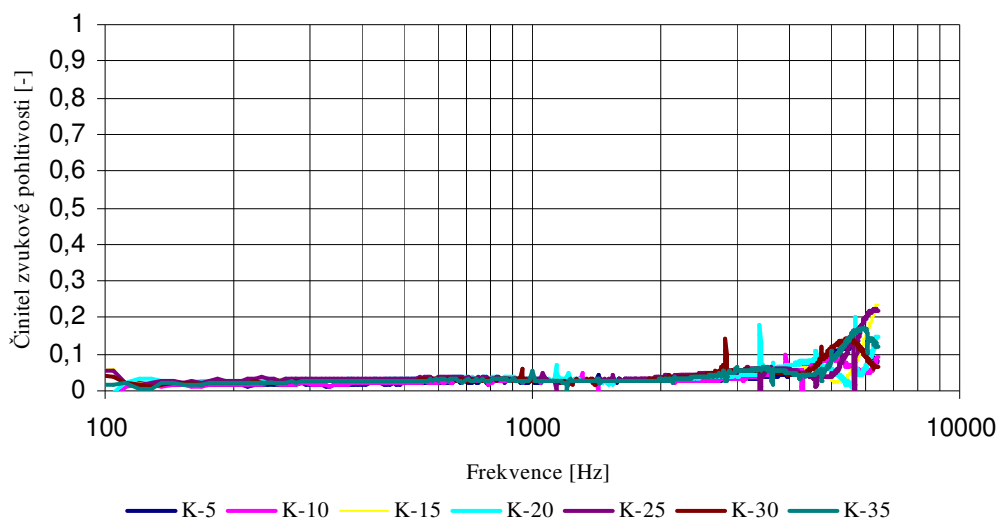
Obr.43: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro vzorek nanovlákněné vrstvy o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$ vkládané do měřící aparatury bez nosného kroužku. Vzorek byl proměřován v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

BK-C

Obr.44: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro vzorek nanovláknenné vrstvy o plošné hmotnosti $3,1 \text{ g.m}^{-2}$ vkládané do měřící aparatury bez nosného kroužku. Vzorek byl proměřován v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

BK-D

Obr.45: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro vzorek nanovláknenné vrstvy o plošné hmotnosti $1,4 \text{ g.m}^{-2}$ vkládané do měřící aparatury bez nosného kroužku. Vzorek byl proměřován v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

Příloha č.3**Kroužek**

Obr.46: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci naměřená pro papírový kroužek bez membrány. Závislost byla proměřena v různých vzdálenostech od odrazivé stěny.

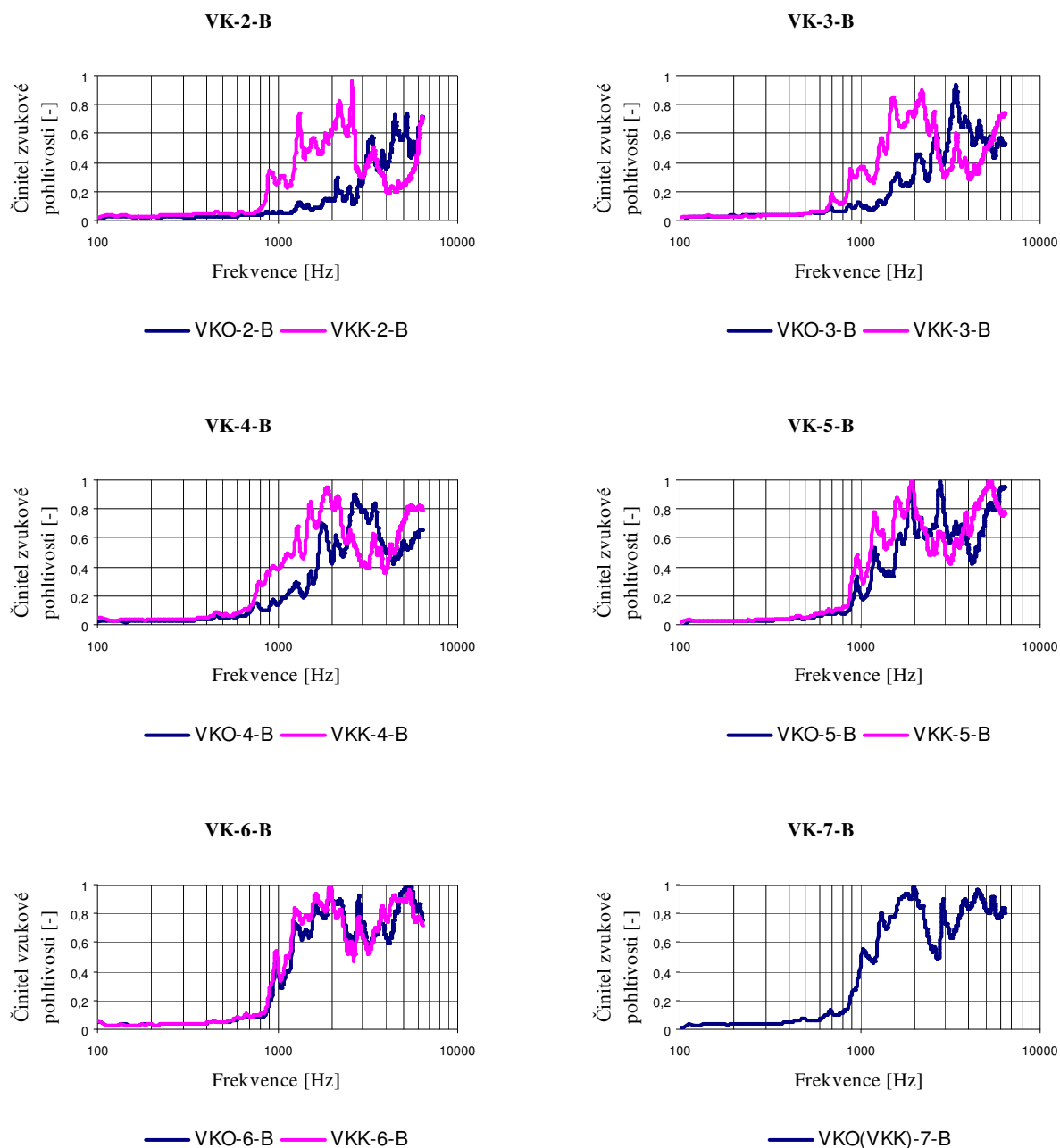
Příloha č.4***Tab.16: Plošná hmotnost nanovrstev.***

Č.vzorku	A [g]	B [g]	C [g]	D [g]
1	0,118	0,043	0,023	0,013
2	0,128	0,054	0,026	0,014
3	0,107	0,076	0,032	0,013
4	0,138	0,076	0,036	0,013
5	0,126	0,048	0,031	0,014
6	0,12	0,049	0,034	0,014
7	0,147	0,063	0,034	0,016
Průměrná hodnota [g/100cm ²]	0,126	0,058	0,031	0,014
Průměrná hodnota [g.m ⁻²]	12,6	5,8	3,1	1,4
Směrodatná odchylka [g.m ⁻²]	1,32	1,35	0,47	0,11

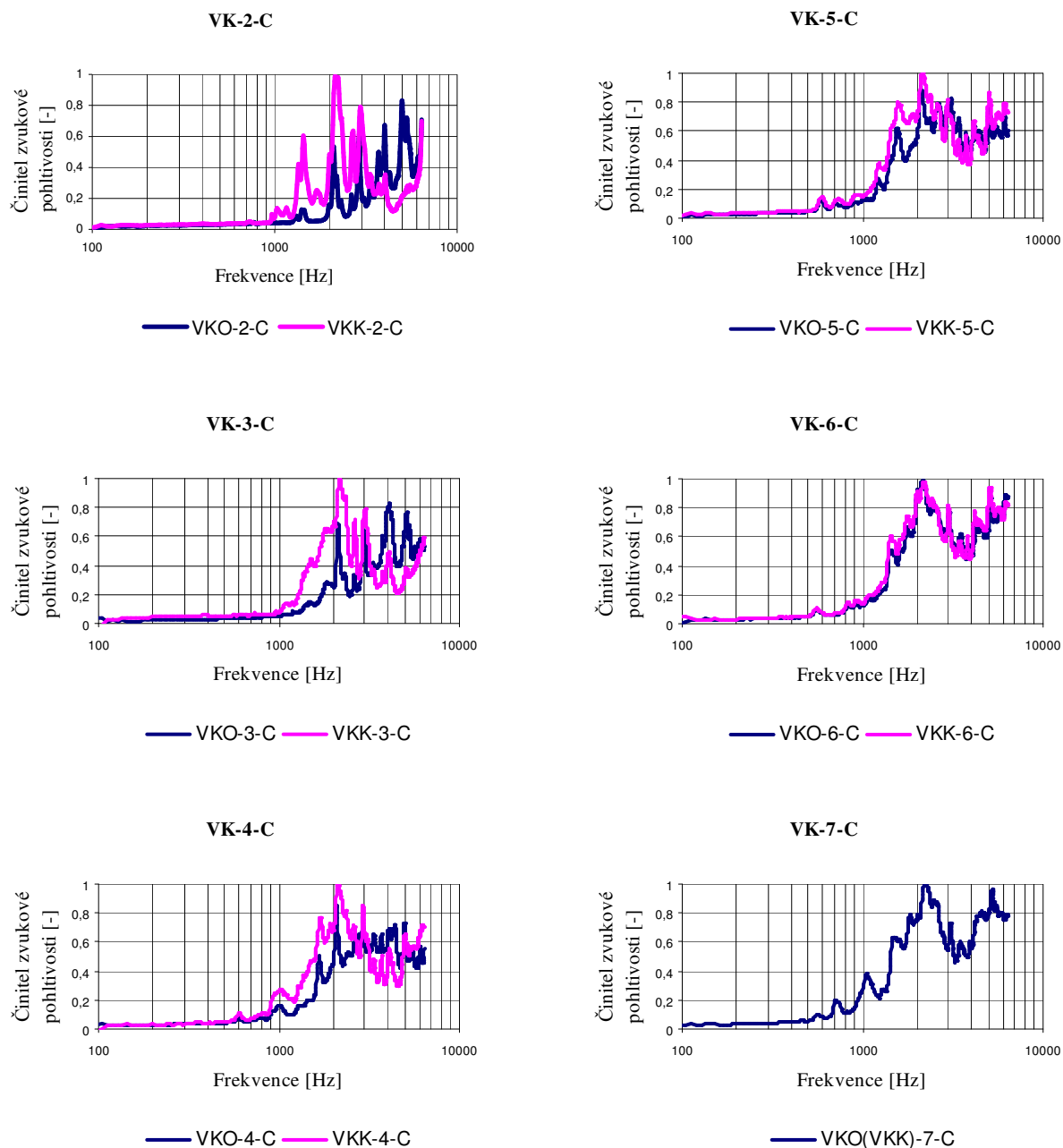
Příloha č. 5

Složení zvlákňovaného roztoku polyvinylalkoholu:

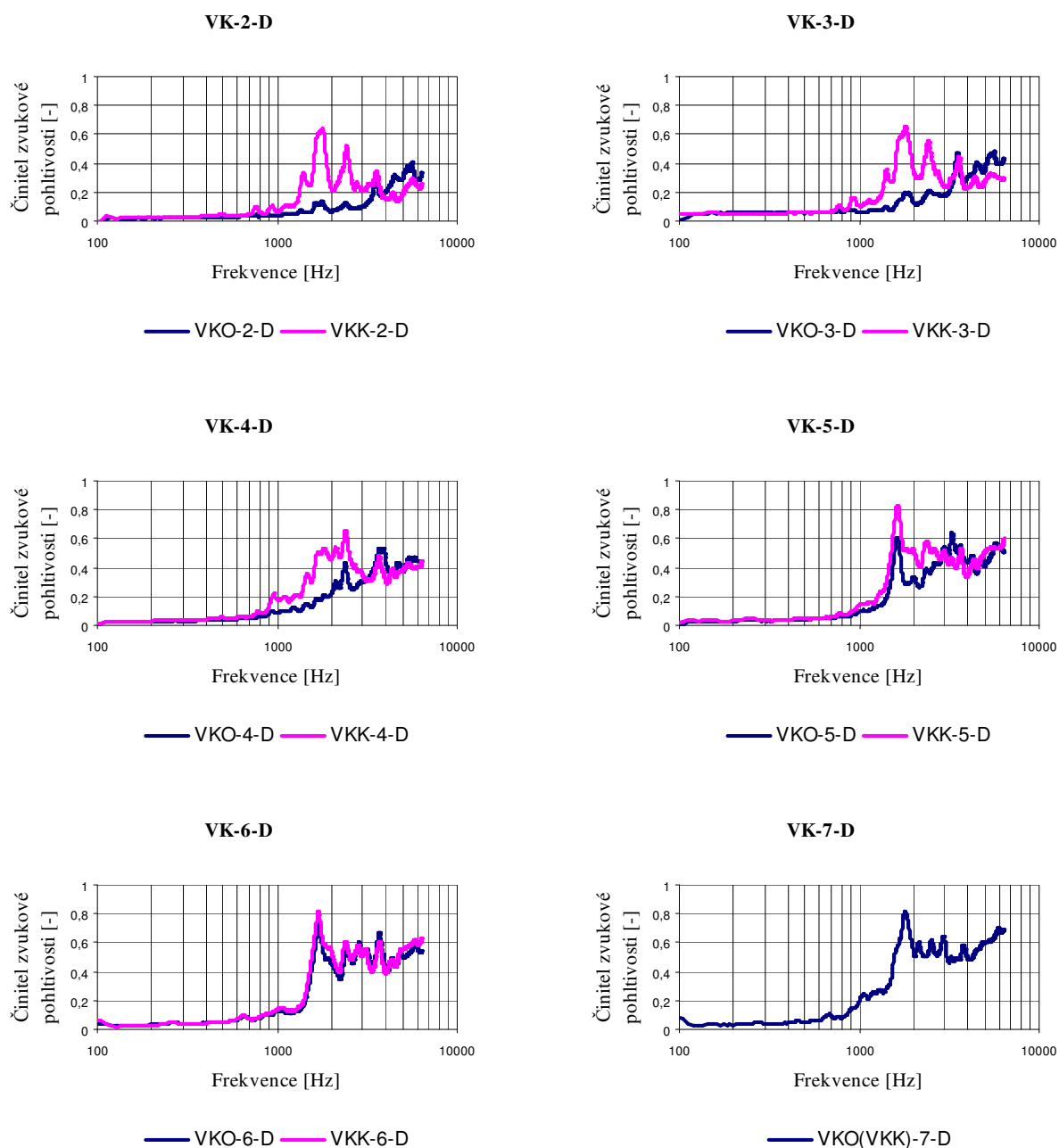
- 1 l Polyvinylalkohol (16 %)
- 9,6 ml Glyoxal (40%)
- 5 ml H_3PO_4 – Kyselina fosforečná (85 %)
- 250 ml H_2O – Destilovaná voda

Příloha č. 6

Obr.47: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy s různým počtem vzorků. Membrána byla tvořena nanovrstvou o plošné hmotnosti $5,8 \text{ g.m}^{-2}$. Jedna křivka v grafu přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhá křivka znázorňuje měření, kdy byl vložen za odrazivou stěnu vzduchový polštář.



Obr.48: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy s různým počtem vzorků. Membrána byla tvořena nanovrstvou o plošné hmotnosti $3,1 \text{ g.m}^{-2}$. Jedna křivka v grafu přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhá křivka znázorňuje měření, kdy byl vložen za odrazivou stěnu vzduchový polštář.



Obr.49: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro absorpční soustavy s různým počtem vzorků. Membrána byla tvořena nanovrstvou o plošné hmotnosti $1,4 \text{ g.m}^{-2}$. Jedna křivka v grafu přísluší měření při kladení vzorků od odrazivé stěny a druhá křivka znázorňuje měření, kdy byl vložen za odrazivou stěnu vzduchový polštář.